

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND

Tehnoloogiainstituut

Edgar Hamburg

**SÜSINIKELEKTROODIDEGA IOONPOLÜMEER-METALL
KOMPOSIITMATERJALI PAINDE JA JÕU VAHELISE
SÕLTUVUSE UURIMINE**

Bakalaureusetöö

Juhendajad: LOTI teadur Urmas Johanson

LOTI doktorant Veiko Vunder

Kaitsmisele lubatud

Juhendaja

Tartu 2013

Sisukord

2	Kirjanduse ülevaade	4
2.1	Elektroaktiivsed polümeerid	4
2.1.1	Ülevaade elektroaktiivsetest polümeeridest	4
2.2	Ioonsed elektroaktiivsed polümeerid.....	6
2.2.1	Ülevaade ionsetest elektroaktiivsetest polümeeridest	6
2.2.2	Ioonsete elektroaktiivsete polümeeride tööpõhimõte	7
2.2.3	Ioonsetes elektroaktiivsetes polümeerides kasutatavate elektrootodimaterjalide mõju liigutusomadustele.....	9
2.2.4	Ioonsetes elektroaktiivsetes polümeerides kasutatavate solventide mõju liigutus-omadustele.....	9
2.2.5	Ioonpolümeer-metall komposiitmaterjalide valmistamistehnoloogiad	10
2.2.6	Ioonsete elektroaktiivsete polümeeride potentsiaalsed rakendused.	10
3	Ekspérimentaalne osa	12
3.1	Kasutatavate aktuaatorite kirjeldus	12
3.2	Jõu-painde sõltuvuse uurimise meetodika kirjeldus.....	13
3.2.1	Kasutatav mõõtesüsteem	13
3.2.2	Jõu-painde sõltuvuse mõõtmise erinevad olukorrad	17
3.3	Jõu-painde sõltuvuse uurimine.....	21
3.3.1	Aktuaatori tagasivajumise iseloomustamine	21
3.3.2	Jõu-painde sõltuvuse uurimine erinevat tüüpi mehaanilise eelpingestatuse korral	21
3.3.3	Mehaaniliselt eelpingestamata aktuaatori jõu-painde sõltuvus erinevatel tööpingetel..	23
3.4	Tulemused ja arutelu	30
	Kokkuvõte	33
	The relation between bending deflection and blocking force of the ionic polymer-metal composite (IPMC) with carbonaceous electrodes	34
	Kasutatud kirjandus.....	35

1 Sissejuhatus

Ioonpolümeer-metall komposiitmaterjal kuulub nn. tarkade materjalide hulka, kuna suudab muundada elektrilist energiat mehaaniliseks (deformatsiooni näol) ning vastupidi. Sellest omadusest tulenevalt saab seda materjali kasutada nii aktuaatori kui sensorina. Aktuaatorina kasutamise korral muundatakse materjalile rakendatud elektriline energia mehaaniliseks energiaks (deformatsiooniks), mille abil on võimalik midagi liigutada. Sensorina kasutamise korral muundatakse materjalis tekitatav mehaaniline deformatsioon elektriliseks energiaks (signaaliks).

Käesolevas töös on uuritud kuldkattega süsinikelektroodidega ioonpolümeer-metall komposiitmaterjali kasutamist aktuaatorina.

Pingeallikaga ühendamisel esineb aktuaatoril liigutus, mida teatud asendis jõuanduri abil blokeerides on võimalik mõõta aktuaatori poolt valitud asendis avaldatavat jõudu. Antud töö eesmärgiks on leida uuritavate aktuaatorite jaoks võimalikult lihtne sõltuvus aktuaatori poolt avaldatava jõu ja aktuaatori liigutuse vahel, kontrollida leitud sõltuvuse kehtivust erinevatel tööpingetel ning erinevate mehaaniliste eelpingestatuste olukorras. Kuna antud töös kasutatavate aktuaatorite kuju on valitud selliselt, et aktuaatori liigutus avaldub paindumisena, siis uuritakse aktuaatori poolt avaldatava jõu sõltuvust aktuaatori paindest.

Sarnaste tööpõhimõtetega aktuaatorite korral on varem jõu-liigutuse sõltuvusi uuritud näiteks tselluloosil põhineva elektroaktiivse paberi [1], piesoelektriliste aktuaatori [2], elektronjuhtival orgaanilisel polümeeril põhinevate elektroodidega ioonpolümeermembraaniga komposiitmaterjali [3] ning plaatinaelektroodidega ioonpolümeer-metall komposiitmaterjali [4] korral. Nendest mõõtmistest on ainult piesoelektriliste aktuaatorite puhul uuritud ka jõu-liigutuse sõltuvust mehaanilise eelpingestatuse korral.

Antud töös uuritud materjali korral ei ole jõu ja liigutuse vahelist sõltuvust varem uuritud ning seega pakub huvi nende materjalide käitumine ja võrdlus varem uuritud sarnaste materjalidega.

2 Kirjanduse ülevaade

Elektroaktiivsed polümeerid (EAP) kuuluvad nn tarkade materjalide hulka. EAPd on võimelised muundama elektrilist energiat mehaaniliseks energiaks (deformatsiooni näol) ning vastupidi. Sellest omadusest tulenevalt võib neid kasutada nii aktuaatorite kui sensoritena. [5]

EAPd on uudsed perspektiivikad materjalid, mis on vaiksed, kerged, painduvad ning lihtsa ehitusega. Nende abil on võimalik luua erineva suurusega liigutavaid süsteeme sobides eelkõige mikrosüsteemide komponentideks. Tavapärased aktuaatorid nagu elektromagnetilised ja pneumaatilised/hüdraulilised süsteemid ei suuda pakkuda selliseid omadusi kuna nende tööpõhimõtte on EAPde omast erinev ning suuruse vähendamisega tekib nende tootmisel mitmeid probleeme. EAPsid on nende lihtsa struktuuri tõttu võimalik toota väga erinevate kujude ning suurustega kuni mikroskaalani välja. EAPde erilisi omadusi saab ära kasutada väga paljudes tehnoloogiavaldkondades – EAP aktuaatoreid ja sensoreid on uuritud kasutamiseks meditsiinis, kosmosetehnoloogias ning robotikas [6-8]. Kuna teatud lähenduses matkivad EAPd biloogiliste lihaste käitumist, siis on uuritud nende kasutamise võimalust kunstlihaste loomiseks bioinspireeritud robotitele. [5, 8-9]

EAPd jaotatakse enamasti kahte klassi: dielektrilised ja ioonsed. Dielektrilistes EAPdes põhjustab liigutust elektrostaatiline jõud kahe elektroodi vahel, mis surub nende vahel oleva polümeeri kokku. Polümeeri ühesuunalise kokkusurumise tulemusena suurenevad polümeeri mõõtmed teistes suundades. Sellist polümeeride mõõtmete muutust käsitletaksegi dielektrilise EAP liigutusena. [10]

Käesoleva töö raames uuriti ioonseid elektroaktiivseid polümeere, milles liigutus tekib rakendatava pinge poolt liikuma pandud ionide ümberpaigutumise tulemusena.

2.1 Elektroaktiivsed polümeerid

2.1.1 Ülevaade elektroaktiivsetest polümeeridest

Mitmesugused polümeersed materjalid on võimelised muundama elektrilist energiat mehaaniliseks energiaks. Nendest tuntuimad on piesoelektrilised polümeerid, dielektrilised elastomeerid, kujumälu polümeerid ja ioonsed polümeerid. [6]

Piesoelektrilised polümeerid on poolkristallilised materjalid, mis on võimelised säilitama püsivat elektrilist polarisatsiooni [11]. Polüvinülideendifluoriid (PVdF) ja selle kopolümeerid on siiani tuntud piesoelektrilistest polümeeridest ühed parimad, sest nende poolt tekitatava deformatsiooni ulatus on suurim just toatemperatuuril. Deformatsiooni põhjustab asümmeetriliste kristallide (dipoolide) ümberorienteerumine rakendatud pinge toimel. Peamisteks puudusteks on vähene liigutusulatus (mikromeetri suurusjärgus) ja kõrge tööpinge (1 kV suurusjärgus). Vähesest liigutusulatusest tulenevalt on piesoelektrilised aktuaatorid sobivad rakendusteks, kus on vajadus väikeste kuid seejuures täpsete liigutuste järgi. [5]

Dielektrilised elastomeerid on üks suurim EAPde alaliikidest [12], ning koosnevad õhukesest elastomeeri kilest kahe painduva juhtiva elektroodi vahel. Välise elektrivälja (100 MV/m) rakendamisel tekib elektroodide vahel Coulomb'i tõmbejõud, mis põhjustab elektrostaatilist rõhku. See omakorda surub elastomeeri kilet ühes suunas kokku ning kile mõõtmed teistes suundades suurenevad. Dielektrilised elastomeerid on võimelised avaldama mehaanilist pinget ning tekitama suhtelist deformatsiooni üle 100%. Peamised dielektriliste elastomeeride puudused on kõrge tööpinge ning madal töökindlus. [5]

Kujumäluga polümeerid suudavad ajutiselt säilitada kuju, mis on nende püsivast kujust erinev ning temperatuuri toimel oma algse, püsiva kuju taastada [13]. Pöörduvad kuju (faasi) muutused toimuvad kuumutamise ning jahutamise tulemusena. Kujumäluga polümeere on võimalik liikuma panna neid elektriliselt soojendades ning nad võivad tekitada väga suurt suhtelist deformatsiooni (üle 100%) ning mõõdukat mehaanilist pinget. Sellised polümeerid reageerivad aeglaselt – liigutus toimub aeglasemalt kui teistel EAPdel, nad töötavad kõrgetel temperatuuridel ning ka kujude arv, mida üks polümeer on võimeline meelde jätma, on piiratud. [5]

Ioonsed elektroaktiivsed polümeerid (IEAPd) on elektroaktiivsete polümeeride alaliik, mille korral mehaanilist liigutust või kuju muutust EAPle elektrilise pinge rakendamise korral põhjustab ionide liikumine (migratsioon) rakendatud pinge toimel ning ka elektroosmoosiga seonduvad efektid. [14]

2.2 Ioonised elektroaktiivsed polümeerid

2.2.1 Ülevade ioonsetest elektroaktiivsetest polümeeridest

Ehkki leidub IEAPsid, mis ei reageeri elektrilise pinge rakendamisel mehaaniliselt, näiteks nutiklaas, siis levinud on IEAP mõiste kasutamine just ioonsete elektromehaaniliselt aktiivsete polümeeride kohta. IEAPde liigutamiseks vajaliku elektrivälja tekitamiseks piisab neile 0,5 - 5 V rakendamisest. [15, 16]

Koostisest sõltuvalt võib levinuimad IEAPd jagada kolmeks: ioonpolümeer-metallkomposiidid (IPMK, inglise keeles *ionic polymer metal composite, IPMC*), süsinik-polümeer komposiidid (SPK, inglise keeles *carbon polymer composite, CPC*), ja elektronjuhtivatel orgaanilistel polümeeridel põhinevad materjalid.

Ioonpolümeer-metallkomposiitide (IPMK) korral on membraaniks (enamasti anioonne) ioonpolümeer, tavaliselt Nafion®, mis sisaldab sulfonaatioone, või Flemion®, mis sisaldab karboksülaatioone. Elektroodideks on keemilisel teel saadud väärismetalli (enamasti kulla või plaatina) kihid. Lisaks on membraani viidud solvent, millest levinuimad on vesi, etüleenglükool või mõni ioonvedelik (kasutatakse ka terminit ioonne vedelik), ning ioonpolümeeri koosseisu kuuluvateleioonidele vastasmärgilised ioonid. Ioonpolümeeri perfluoreeritud (fluori sisaldavad) süsinikahelad on hüdrofoobsed, kuid selle koosseisu kuuluvad anioonid on hüdrofiilsed. Selle tõttu tekivad sellises polümeeris kahte tüüpi piirkonnad (klastrid), millest ühed (perfluoreeritud süsinikahelad) on tugevalt hüdrofoobsed ja teised (polümeeri ioonsed osad ning nende laengut kompenseerivad vastasmärgilised ioonid) on tugevalt hüdrofiilsed. Sellise ioonpolümeeri paigutamisel polaarsesse solventi tungivad solvendi molekulid polümeeri ioonsetesse (hüdrofiilsetesse) piirkondadesse ja vastav polümeer pundub. Pundumise käigus moodustuvad algselt kompaktsesse polümeeri solventi sisaldavad poorid. Anioonid on kovalentsete sidemetega perfluoreeritud süsiniku põhiahelaga tugevalt seotud kuid katioonid on seotud vaid polümeeri struktuuris olevate anioonidega vastasmärgiliste laengute elektrostaatilise tõmbe kaudu ning saavad pinge rakendamisel polümeeris liikuda. [17-18]

IPMK üheks omapäraks on relaksatsiooni esinemine liigutuse käigus: kui IPMKle rakendada alalispinge, siis tekib kiire liigutus katoodi suunas, millele järgneb relaksatsioon ehk aeglasem liigutus algsele liigutusele vastupidises suunas (anoodi suunas). Eriti iseloomulik on

relaksatsioon anioonsete ionopolümeeride korral, milles on solvendiks on vesi ning elektriväljas liikuvateks katioonideks tugevalt hüdratiseeritud leelismetallide ioonid (Na^+ , K^+ ja eriti Li^+). Nende korral toimub relaksatsioon ka eriti suures ulatuses. Suurte orgaaniliste katioonide korral, nt tetrabutüülammooniumi korral on väike relaksatsioon täheldatav nii Nafioni kui Flemioni sisaldavates komposiitides. Väikeseid orgaanilisi katioone nagu tetrametüülammoonium sisaldavatel ionopolümeeridel esineb mõõdetav relaksatsioon Nafioni puhul kuid Flemioni puhul mitte. [14, 17]

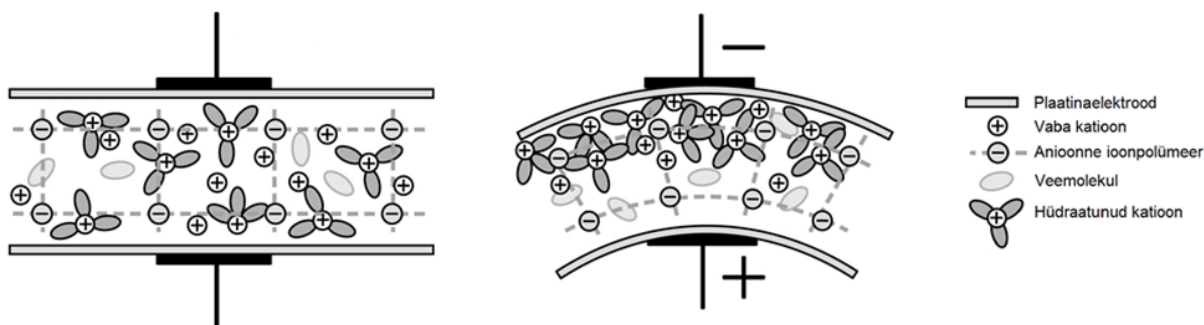
Süsinik-polümeerkomposiitide (SPK) korral koosneb membraan poorsest polümeerkarkassist, nagu näiteks polüvinülideendifluoriid (PVdF) või polü(-vinülideendifluoriid-koheksafluoropropüleen) (PVdF(HFP)). Ioonvedelik on SPK korral nii solvendiks kui ka ionide allikaks. Elektroodideks kasutatakse suure eripinnaga süsinikutahma (inglise keeles *carbon black*), aktiivsütt, karbiidset süsinikku ning süsinikaerogeele. [14-15, 17-19]

Elektronjuhtivatel orgaanilistel polümeeridel põhinevad komposiidid koosnevad enamasti poorsest polümeerkarkassist, näiteks PVdF, solvendist ja ionide allikana elektrolüüdist, mis võib olla ka ioonvedelik. Elektroodidena kasutatakse orgaanilisi polümeere, nagu näiteks polüpürrool, polüaniliin, polütiofeen jt. [14]

2.2.2 Ioonsete elektroaktiivsete polümeeride tööpõhimõte

Ioonpolümeer-metallkomposiitmaterjali tööpõhimõte

Joonisel 1 on kujutatud plaatinaelektroodiga IPMK tööpõhimõte [20]. Kui anioonseid rühmi sisaldavast ionopolümeerist valmistatud IPMK ühendada pingeallikaga, siis katioonid liiguvad elektrivälja toimet negatiivse laenguga elektroodi (katoodi) suunas, võttes kaasa endaga seotud solvendimolekulid. Selle tagajärjel tekib olukord, kus anoodi läheduses on klastrite koosseisus vähe katioone ning katoodi läheduses on klastrite koosseisus palju solvateerunud katioone. Sellise ionide ja solvendi ümberpaigutuse tõttu paindub materjal anoodi suunas. Sellise liigutuse konkreetsete põhjustena on pakutud osmootse rõhu muutumist ionide ümberpaigutumise tõttu, polümeeri efektiivse jäikuse suurenemist katoodil ning vähenemist anoodil, katioonideta jäänud anioonide suurenenud elektrostaatilisest tõukumist jpm. [17-18, 21]

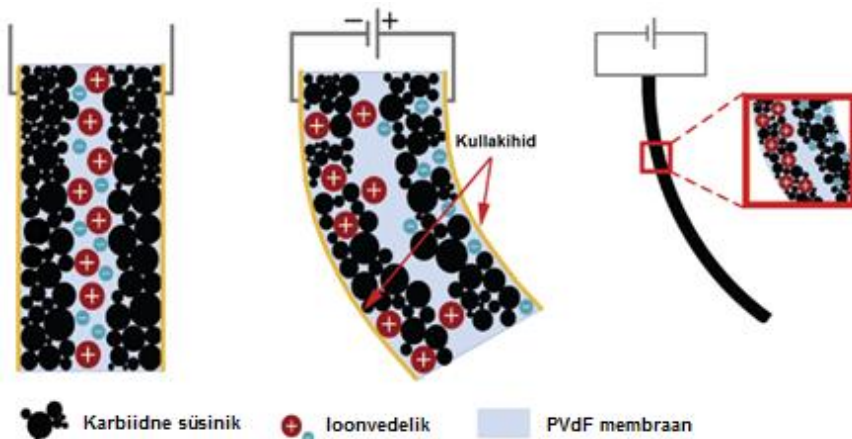


Joonis 1. Platinaelektroodidega IPMK tööpõhimõte.

Pinge rakendamisel paindub IPMK ajapikku (enamasti mõnede kümnete sekundite jooksul, sõltuvalt konkreetselt IPMKst) teatud lõplikku asendisse. Sellise asendi korral on tekkinud osmootne tasakaal, katioonid on liikunud katoodile ja seejuures endaga kaasa tõmmanud ka nendega seotud solvendimolekulid, mis toob endaga kaasa katoodis lokaalse ülerõhu tekkimise. Sellest tingituna hakkab solvent liikuma nii tagasi anoodi suunas kui ka läbi elektroodi pindkihi IPMKst välja ning tekitatud deformatsioon hakkab vähenema, s.t esineb IPMK relaksatsioon. [17, 21]

Süsinik-polümeer komposiitmaterjali tööpõhimõte

SPK tööpõhimõte sarnaneb IPMK omale ning on kujutatud joonisel 2 [22]. Pinge rakendamisel hakkavad poorses polümeerkarkassis (joonisel 2 PVdF) oleva ionvedeliku ioonid liikuma: katioonid negatiivse laenguga elektroodi (katoodi) suunas ning anioonid positiivse laenguga elektroodi (anoodi) suunas. Kuna ionvedelikus on tavaliselt üks, kas kation või anioon, teisest suurem, siis paisuvad poorsed süsinikelektroodid nende poole tõmmatavate erimärgiliste ionide suuruste erinevuse tõttu erinevalt (suuremaid ioone ligi tõmbav elektrood paisub rohkem ning moodustab painutusel kõveruse välimise külje). [23]



Joonis 2. SPK tööpõhimõte.

Elektronjuhtivatel orgaanilistel polümeeridel põhinevate komposiitide tööpõhimõte

Elektronjuhtivad orgaanilised polümeerid omavad konjugeeritud sidemetega pikka süsinikahelat (põhiahel). Pinge rakendamisel toimuvad polümeeris redoksprotsessid, mille tagajärjel muutuvad polümeeri koostisosade oksüdatsiooniastmed. Selle tulemusena väheneb/suureneb laeng polümeeri põhiahelas. Muutunud laengu tasakaalustamiseks liiguvad elektrolüüdi ioonid põhiahela juurde, et laengut tasakaalustada. Polümeeride ahelate vahele lisanduvad ioonid põhjustavad ühe elektroodi paisumist ja teise kokkutõmbumist, mille tõttu esineb sellisel EAPi liigutus. [24-25]

2.2.3 Ioonsetes elektroaktiivsetes polümeerides kasutatavate elektroodimaterjalide mõju liigutusomadustele

Elektroodidena kasutatavate materjalide omadused määravad IEAP liigutusomadused. Elektroodide materjal peab vastama järgmistele tingimustele: ei tohi puruneda paindumisel, peab olema kergesti deformeeritav, peab membraani pinnaga nakkuma, peab olema vastupidav keskkonnatingimustele ning hästi elektrit juhtima. Hea elektrijuhtivus tagab selle, et IEAPile rakendatava pinge poolt tekitatav elektriväli levib kogu IEAP ulatuses, mitte ainult pinge rakendamise kohas. Hea elektrijuhtivuse saavutamiseks kasutatakse metalle. Kuna just kullal ja plaatinal on eelpool nimetatud omaduste optimaalne vahekord, on kuld ja plaatina kõige levinumad elektroodimaterjalid IPMKde korral. Näiteks SPKd reageerivad aeglasemalt kui IPMK, sest elektroodidena kasutatava süsiniku elektrijuhtivus on tunduvalt väiksem IPMK korral kasutatavate metallide elektrijuhtivusest. [14, 26]

2.2.4 Ioonsetes elektroaktiivsetes polümeerides kasutatavate solventide mõju liigutusomadustele

Solvendi valik mõjutab tugevalt IEAP liigutusomadusi. Mida viskoossem on solvent, seda raskem on ioonidel liikuda ning seda aeglasem on liigutus. Vesi on väga levinud solvent, kuna ta on hõlpsasti kättesaadav, odav ning väheviskoosne. Samas seab vee kasutamine solvendina piirangut kasutatavale pingele, kuna juba suhtelistelt madalatel pingetel (ligi 1,23 V, täpne pinge sõltub vesinikioonide kontsentratsioonist ja membraani juhtivusest) hakkab toimuma

vee elektrolüüs ning see põhjustab solvendi koguse vähenemist, mis omakorda vähendab IEAP liikumisvõimet. Elektrolüüsil tekkiva gaasi eraldumine kahjustab elektroode ning muudab IEAP käitumise raskesti kontrollitavaks. [14, 18]

2.2.5 Ioonpolümeer-metall komposiitmaterjalide valmistamistehnoloogiad

Impregneerimis-redutseerimismeetod

IPMKsid valmistatakse enamasti impregneerimis-redutseerimismeetodi abil, mille korral kaetakse õhuke ioonpolümeeri kiht (kile) keemilisel teel metalliga. Sellisel juhul viiakse algselt katioonne metallikompleks pundunud ioonpolümeeri kilesseioonvahetuse teel ja järgnevalt redutseeritakse see kompleks selliselt, et ioonpolümeeri pindkihti ja pinnale tekib metall. Enamikel juhtudel korratakse elektroodi parema juhtivuse saamiseks seda protsessi 3 kuni 5 korda. Sellisel teel saadakse ioonpolümeerile enamasti kulla ja plaatina katteid. Selle meetodi suureks puuduseks on suur ajakulu valmistamisel ja saadud materjali ebaühtlased omadused. Tavaliselt on tekkiv metallelektrood ebaühtlase paksusega ja sellest tingituna on selliste elektrootide elektrijuhtivus laiades piirides varieeruv. [14]

Otsene koostemeetod

IPMK-de valmistamise oluliselt kiiremaks valmistamise meetodiks on otsene koostemeetod (inglise keeles *direct assembly process, DAP*). See meetod võimaldab kasutada elektrootimaterjalina näiteks ruteenium(IV)oksiidi (RuO_2) või erinevaid suure eripinnaga süsinikpulbreid. Otsese koostemeetodi korral kantakse ioonvedelikus pundunud ioonpolümeerile elektrootikiht aerograafi abil. Valmistatud komposiidi pinnale lisatakse õhuke kulla või plaatinaleht selleks, et tagada elektrootide parem elektrijuhtivus. [14, 16]

2.2.6 Ioonsete elektroaktiivsete polümeeride potentsiaalsed rakendused.

Ioonsetest elektroaktiivsetest polümeeridest on enim uuritud IPMKsid ning seetõttu baseeruvad näited potentsiaalsetest rakendustest just neil, ehkki samadeks rakendusteks on põhimõtteliselt võimalik kasutada ka teisi IEAPsid.

IPMKsid saab hästi rakendada juhtudel, kus on vaja suuri liigutusulatusi ning nende poolt avaldada madalat või keskmist mehaanilist pinget [5]. Samuti on nende üks kasutusvaldkond sellistes olukordades, kus saab kasutada ainult madalaid pingeid (0,5 kuni 5 V) [16].

IPMKde kasutamist sensoritena on uuritud aktiivsel mürasummutamisel vibratsioonisensoritena kasutamiseks [27]. IPMKsid on aktuaatoritena kasutatud mehaaniliste haaratsite, mõõteventiilide ja membraanpumpade koostamisel [28]. Teatud lahenduste abil on võimalik IPMK painutust muundada lineaarseks liigutuseks, mida saab ära kasutada mitmesugustes robotilistes käsitsusseadmetes [13]. IPMKsid on uuritud ka järgnevate biomeditsiiniliste ja inimesi abistavate seadmete valmistamisel kasutamiseks: aktiivne mikrokateeter, siirdatav südame abiseade, kirurgilised riistad, peristaltilised pumbad ning õhuke lehtaoline Braille kirja ekraan [12, 29-30].

IPMK aktuaatoreid on kasutatud bioinspireeritud robotite ja paljude kalalaadsete robotikasüsteemide valmistamisel [8-9, 27, 30-31]. Lisaks kõverdumisele on võimalik spetsiaalse elektroodi ehitusega saavutada IPMK väändumine, mida oleks võimalik kasutada kala uimede tööd matkiva seadme konstrueerimisel [32].

3 Eksperimentaalne osa

3.1 Kasutatavate aktuaatorite kirjeldus

Antud töö raames tehtud mõõtmistel kasutati Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudi arukate materjalide ja süsteemide laboris valmistatud kullaga kaetud süsinikelektroodidega ionopolümeer-metall komposiitmaterjali.

Uuritava aktuaatori materjali valik tuleneb seda tüüp aktuaatorite eelistest teiste ees: kasutatud aktuaatori liigutus on kiirem, liigutusulatus on suurem ning liigutusulatus on ajas püsiv [5]. Kasutatud aktuaatoritega tehtud eelmõõtmised näitasid, et aktuaator on võimeline andma ajas hästi reprodutseeritavaid tulemusi lisaks liigutusulatusele ka avaldatava jõu mõõtmisel.

Antud töös kasutatud aktuaatorid valmistati doktorant Inga Põldsalu poolt otsesel koostemeetodil (täpsemalt kirjeldatud peatükis 2.2.5), mille käigus kanti ionvedelikus pundunud ionopolümeermembraanile elektroodikiht aerograafi abil. Membraanina kasutati Nafion 117 ionopolümeermembraani, millesse oli solvendina sisse viidud ioonne vedelik 1-etüül-3-metüülimidasoolium trifluorometaansulfonaat (EMIm-TFS). Elektroodimaterjalina kasutati TiC-st sünteesitud kõrge eripinnaga aktiivsütt. Süsinikelektroodid kaeti omakorda õhukese ~130 nm paksuse 24 kt kullakihi. Kogu aktuaatori paksus oli 250-280 µm. Aktuaator valmistati algselt suurema tükina mõõtudega $5,5 \times 5,5$ cm, millest lõigati edaspidistes mõõtmistes kasutamiseks kolm 1×4 cm aktuaatorit. Kasutatud aktiivsöe ning valmis aktuaatori tähtsaimad füüsikalised suurused antud töö jaoks on välja toodud tabelis 1 [5].

Tabel 1. Töös elektroodimaterjaliks kasutatud karbiidse süsiniku ning valmis aktuaatori tähtsamad füüsikalised parameetrid.

Süsinik			Aktuaator	
Tihedus (g cm ⁻³)	Eripind (m ² g ⁻¹)	Juhtivus (mS cm ⁻¹)	Jäikus (MPa)	Elektroodi takistus (Ω cm ⁻¹)
0,8	1450	~ 50	97	0,7

Kuna antud materjali ei toodeta tööstuslikult, siis valmistamisprotsessist tulenevate iseärasuste tõttu ei ole valminud materjal täiesti homogeenne. See põhjustab muuhulgas ka ühest ja samast suuremast tükist lõigatud aktuaatorite erinevat käitumist. Peamine

ebahomogeensuse põhjus tuleb aerograafiga elektroodide pealekandmisest. Suspensioon, mida aerograafiga pihustatakse ei püsi pihustamise kestel täielikult homogeensena – esineb mõningane süsiniku sedimentatsioon, mistõttu ei ole valmistatav elektroodikiht ühtlane. Parema ühtluse tagamiseks kantakse elektroode peale mitmes kihis – antud töös kasutatud aktuaatorile on kantud kummalegi poole 8 kihti – kuid see ei pruugi tagada ideaalset tulemust.

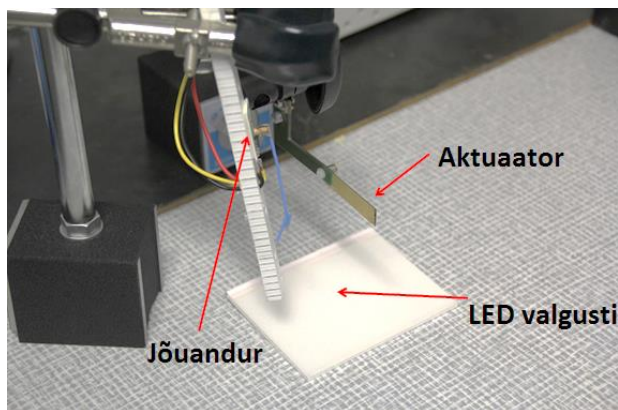
Kolmest valmistatud aktuaatorist ühel oli elektroode kattev kullakiht pragunenud ja seda otsustati põhimõõtmistel mitte kasutada. Kahest tervete kullakihtidega aktuaatorist kasutati põhimõõtmistel üht, mis käitus kõige sümmeetrilisemalt, s.t sellist aktuaatorit, mis käitus erinevate sama pinge eri polaarsuste rakendamisel võimalikult ühtmoodi. Selleks, et erinevatel pingetel mõõdetud jõu-painde sõltuvusi omavahel võrrelda, tehti kõik antud töös kasutatud mõõtmised ühe ja sama, kõige sümmeetrilisemalt käitunud, tervete kullakihtidega aktuaatoriga. Teist tervete kullakihtidega aktuaatorit kasutati pisteliselt kontrollmõõtmiste sooritamiseks.

3.2 Jõu-painde sõltuvuse uurimise meetodika kirjeldus

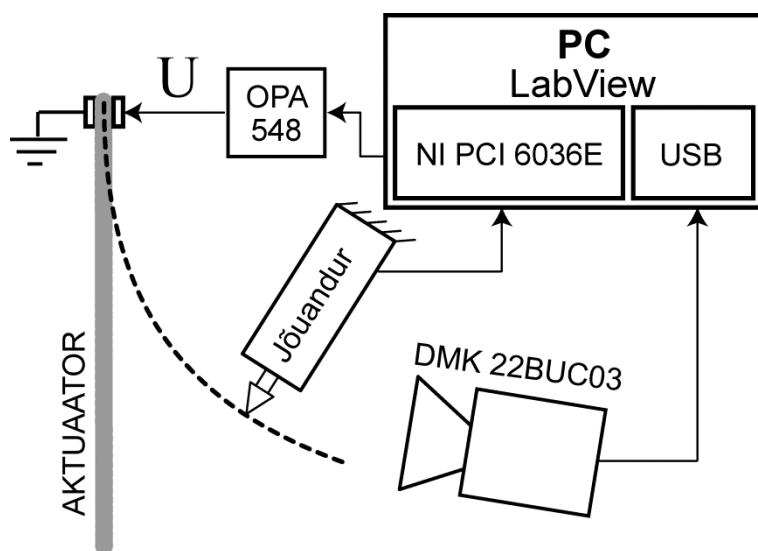
3.2.1 Kasutatav mõõtesüsteem

Aktuaatori liigutamiseks ning tema poolt avaldatava jõu mõõtmiseks kokku seatud mõõtekompleks on kujutatud joonisel 3 ning skeemina ära toodud joonisel 4. Aktuaator oli seatud klemmide vahele laua tasapinna kohale horisontaalsesse asendisse serviti. Aktuaatorile pinge rakendamiseks kasutati PCI 6036E (National Instruments) andmehõiveseadet ja pingevõimendit OPA 548 (Texas Instruments). Aktuaatori liigutus registreeriti pealtpoolt DMK 22BUC03 (The Imaging Source) kaameraga. Et suurendada kaamera jaoks kontrasti aluspinna ja aktuaatori serva vahel valgustati aktuaatorit LED-valgustiga. Jõu registreerimiseks kasutati jõuandurit Millinewton (IPR EPFL, Šveits), mõõtepiirkonnaga 0-80 mN, veaga 1% mõõtepiirkonnast. Jõuanduri signaal registreeriti sagedusega 2,5 kHz, ning keskmistati üle 250 lugemi, mille tulemusena saadi jõuanduri veaks $\Delta = \frac{0,01 * 80 \text{ mN}}{\sqrt{250}} = 0,0506 \text{ mN}$. Jõuanduri mugavaks kinnitamiseks ning paikaseadmiseks kinnitati see plastikust rakise külge. Andurist saadud signaal registreeriti PCI 6036E (National Instruments) andmehõiveseadmega.

Eksperimenti juhtimiseks kasutati National Instruments LabVIEW tarkvara, mis võimaldas üheaegselt juhtida aktuaatori sisendpinget ja registreerida jõuanduri näitu. Selleks koostati spetsiaalne programm, mis muuhulgas teostas mitmeid pilditöötlusoperatsioone, et tuvastada igale registreeritud videokaadrile vastav aktuaatori kuju.



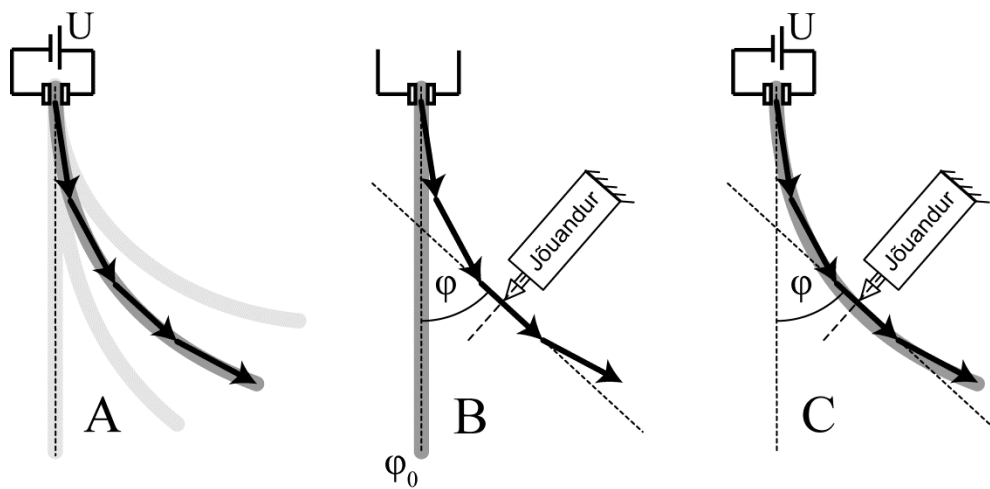
Joonis 3. Aktuaatori jõu-painde sõltuvuse uurimiseks kokkuseatud mõõtekompleks, kaamera asub aktuaatori kohal 1 m kõrgusel.



Joonis 4. Jõu-painde sõltuvuse mõõtmiseks üles seatud mõõtekompleksi skeem.

Aktuaatori painde leidmist on kujutatud joonisel 5. Kõigepealt teostati aktuaatoriga täisliigutus ning salvestati see videona. Täisliigutuse all on mõeldud aktuaatori jõudmist rakendatud pinge toimel maksimaalse paindeni ning lühistamise toimel algasendisse tagasi. Seejärel valiti videolt meid huvitav aktuaatori paine ning aktuaatori paindenurga leidmiseks jaotas programm liigutuse video põhjal aktuaatori vektoriteks pikkusega 2,5 mm (joonis 5A). Seejärel leidis programm kraadides iga vektori kõrvalekalde φ aktuaatori algasendist φ_0

(joonis 5B). Kuna klemmidele lähemal olevate vektorite kõrvalekalle algasendist oli väiksem, kui vaba otsa läheduses olevatel vektoritel, siis sõltub paindenurk ka sellest, millist vektorit aktuaatoril vaadata. Sellest tulenevalt on kõik mõõtmised tehtud kasutades vektorit, mille keskpunkt on aktuaatori klemmide vahelisest otsast 3,6 cm kaugusel. Jõuanduri paremaks paikaseadmiseks kasutati valitud vektori sihi normaali (Joonis 5B). Seejärel aktuaatorile uuesti pinget rakendades oli võimalik mõõta aktuaatori poolt avaldatavat jõudu valitud painde korral (joonis 5C).



Joonis 5. Jõuanduri paikaseadmine.

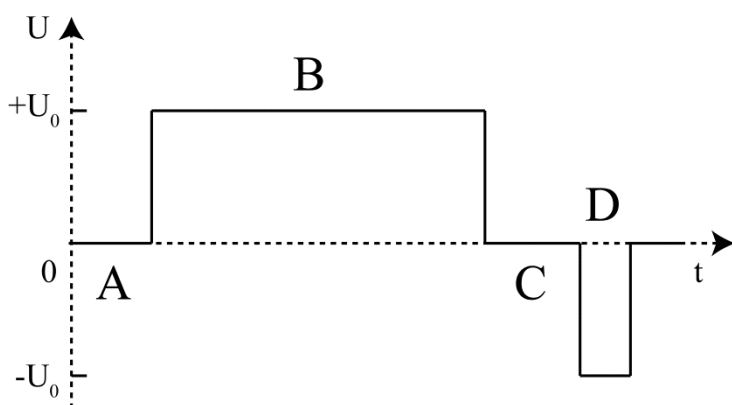
Joonisel 5A kujutatud olukorras on aktuaatorile rakendatud positiivne polaarsus ning sellest tulenevalt loetakse aktuaatori painde väärtus ning painde suund positiivseks. Negatiivse pinge rakendamisel paindub aktuaator algasendi φ_0 suhtes teises suunas, painde suund ja vastava paindenurga väärtus loetakse negatiivseks.

Vektoriteks jaotatud aktuaatori pilti oli võimalik kuvada reaajas jooksva kaamerapildi peale. See andis võimaluse valida videolt pilt, kus aktuaator oli meid huvitava painde all ning seada reaajas jooksva pildi abil jõuandur paika valitud painde all aktuaatori poolt avaldatava jõu mõõtmiseks.

Aktuaatorile rakendati muudetava kestusega ristküliksignaali. Esimese sekundi jooksul oli aktuaator lühistatud, ning selle jooksul mõõdeti jõuanduri nullnivoo. Seejärel rakendati aktuaatorile pinge, mis põhjustas aktuaatori liigutuse vastu jõuandurit. Aktuaatorit liigutavale signaalile lisaks koosnes kogusignaal veel lühistamisest ning vastusignaalist. Lühistamise jooksul rakendati aktuaatorile pinge 0 V ning selle eesmärgiks oli lasta aktuaatoril mõnede sekundite jooksul tagasi vajuda algasendile lähedasse asendisse. Vastusignaal oli jõu

mõõtmisel kasutatud pinge, kuid vastupidise polaarsusega signaal ning seda kasutati aktuaatori algasendi kiiremaks taastamiseks. Vastusignaali kasutamist algasendi kiiremaks taastamiseks on välja pakkunud ka teised autorid [33].

Joonisel 6 on skemaatilisel kujutatud kasutatud signaali. Kasutatav signaal jaotub osadeks: A – aktuaator on lühistatud jõuanduri nullnivoo määramiseks; B – jõu mõõtmisel kasutatav signaal (pingega $+U_0$), C – lühistamine aktuaatori tagasivajumiseks, D – vastusignaali (pingega $-U_0$) aktuaatori algasendi kiiremaks taastamiseks.



Joonis 6. Jõu-painde sõltuvusel kasutatava signaali osad.

Kasutatud signaali osade pikkust oli võimalik muuta vastavalt vajadusele. Sõltuvalt konkreetsest aktuaatorist ning mõõtmise iseloomust leiti sobivad signaaliosade pikkused katseliselt.

Jõu mõõtmise signaali pikkus valiti selliselt, et selle jooksul jõuaks jõuanduri poolt registreeritav jõud küllastusse. Samas ei tohtinud aktuaator liiga kaua küllastusasendis pinge all olla, sest see rikuks aktuaatori.

Lühistamise pikkus valiti nii, et selle aja jooksul jõuaks aktuaatori silmaga nähtav tagasivajumine lõpule. Kõrgematel pingetel lühistati aktuaatorit kauem, kuid ühe ja sama pingega teostatud mõõtmiste korral lühistamise pikkust ei muudetud.

Vastusignaali pikkus valiti selline, et aktuaator pärast vastusignaali tagasi vajudes jõuaks mõnede sekundite jooksul algasendile võimalikult lähedasse asendisse. Ühel pingel tehtud mõõteseria käigus tuli vastusignaali pikkust muuta – suuremate painete korral läks aktuaatori algasendi taastamiseks vaja pikemat vastusignaali kui väikeste painete korral. Seejärel lasti

aktuaatoril mõnede kümnete sekundite jooksul veelgi tagasi vajuda ning võis käivitada uue mõõtmise.

Näiteks pingega 1,5 V tehtud mõõteseeriade korral oli aktuaatori poolt avaldatava jõu mõõtmisel kasutatava signaali pikkus 20 s, aktuaator lühistati 15 s jooksul ning vastusignaali pikkus oli väikeste painete korral 3 s, suuremate painete korral 4 s.

3.2.2 Jõu-painde sõltuvuse mõõtmise erinevad olukorrad

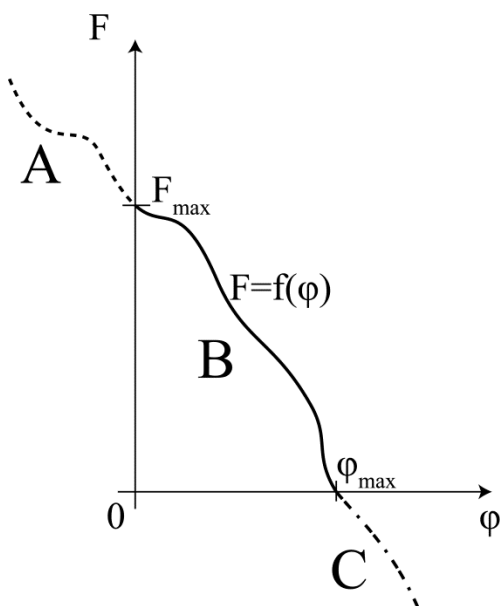
Aktuaatori poolt avaldatava jõu mõõtmisel võib eristada kahte olukorda sõltuvalt aktuaatori olekust mõõtmise alguses: mehaaniliselt eelpingestamata ning mehaaniliselt eelpingestatud olekus jõu mõõtmine. Mõlemal juhul tehakse enne jõu mõõtmist aktuaatoriga täisliigutus kummagi polaarsusega (s.t mõlemas suunas), et registreerida video, mille järgi jõuandurit paika panna.

Mehaaniliselt eelpingestamata olukorras toimub jõu mõõtmine analoogselt joonisel 5 kujutatud jõuanduri paikaseadmisega. Sellise jõu mõõtmise alguses on enne elektrilise pinge rakendamist aktuaator algasendis ning jõuandur on seatud eemale, meid huvitava nurga ϕ alla (Joonis 5B). Elektrilise pinge rakendamisel paindub aktuaator nurgani ϕ , mille juures me jõudu mõõdame, ning surub valitud nurga all vastu jõuandurit (Joonis 5C), mis registreerib aktuaatori poolt avaldatava jõu. Aktuaatorit erinevate nurkade alla seadmisega võime mõõta aktuaatori poolt erinevatel painetel avaldatava jõu.

Joonis 7 kujutab jõu-painde sõltuvuse graafikut. Mehaaniliselt eelpingestamata olukorras mõõdetud jõu-painde sõltuvus on tinglikult tähistatud tähisega B. Aktuaatori algasendis, kui aktuaatori paine on 0° jõudu mõõtes saame maksimaalse jõu, mida aktuaator kasutataval pingel avaldada suudab. Järjest suuremate paindenurkadeni liigutades hakkab suurenema aktuaatori deformeerumisest põhjustatav elastussjõud, mis algasendis oli deformatsiooni puudumise tõttu 0. Seetõttu hakkab paindenurkade kasvades jõuanduri poolt mõõdetav summaarne jõud vähenema kuni maksimaalse paindeni ϕ_{\max} , mille puhul on jõuandurile avaldatav summaarne jõud 0. Maksimaalse painde juures on aktuaatori paigal ning jõuandurile jõudu ei avalda, sest pinge rakendamisel aktuaatoris tekkiv jõud on elastussjõuga sama väärtuse, kuid vastupidise suunaga.

Sellel on jõu-painde graafikul defineeritud kaks punkti, millest jõu-painde sõltuvus $F=f(\varphi)$ läbi minema peab: maksimaalse jõu punkt F_{\max} , kus paindenurk on 0° ning maksimaalse painde punkt φ_{\max} , kus jõud on 0.

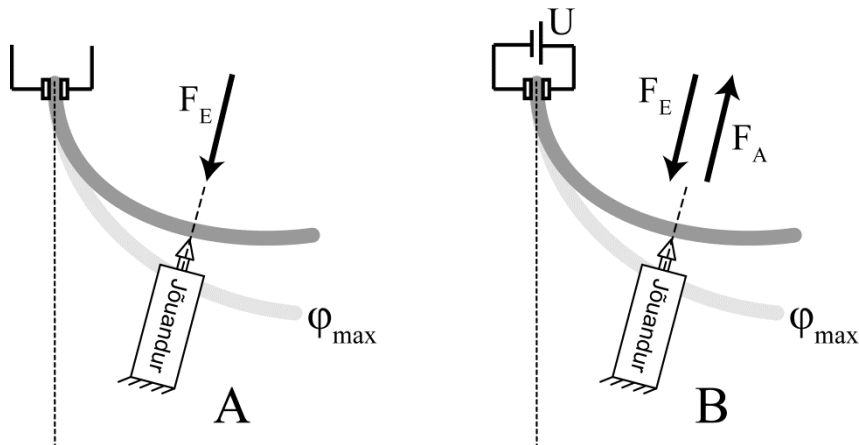
Pikendades uuritavat jõu-painde sõltuvust allapoole jõu nullnivood, negatiivse jõu suunas (joonisel 7 tähisega C) ning algasendist teisele poole (joonisel 7 tähisega A) saame mõõta jõu-painde sõltuvused mehaanilise eelpingestatuse korral.



Joonis 7. Jõu-painde sõltuvus ning selle erinevad piirkonnad: mehaaniliselt eelpingestamata (B) ning mehaaniliselt eelpingestatud olukorrad (A ja C).

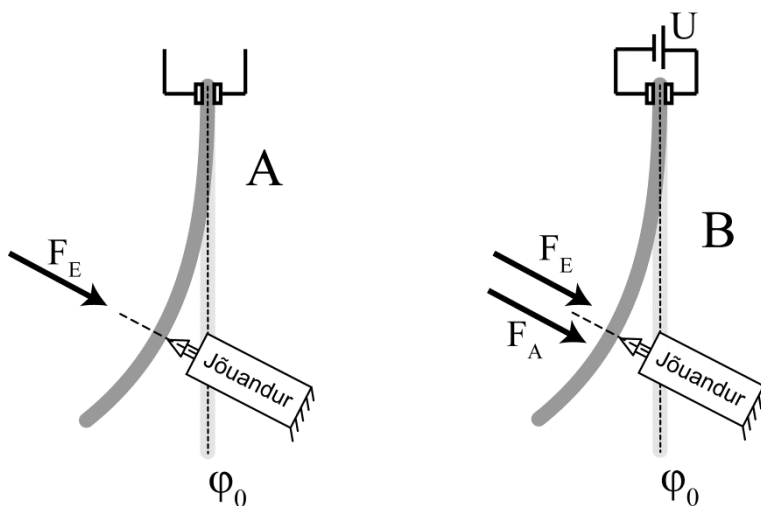
Jõu mõõtmist C-piirkonnas on kujutatud joonisel 8. C-piirkonnas mõõdetakse jõudu suurematel paindenurkadel kui φ_{\max} . Jõu mõõtmiseks deformeeritakse aktuaator jõuanduri abil suurema paindeni, kui φ_{\max} (joonis 8A). Sellisel juhul mõjub aktuaatori poolt jõuandurile vaid elastsusjõud (F_E), mille suund on joonisel ära toodud noolega. Aktuaatorile pinge rakendamisel tekib aktuaatoris jõud (F_A), mille suund on joonisel 8B märgitud samuti noolega. Sellises olukorras jõu mõõtmisel mõõdetakse negatiivsed jõuväärtused, sest maksimaalsest paindenurgast suurematel nurkadel on elastsusjõud suurem kui liigutusjõud.

Kuna tegu on jõu mõõtmise põhimõtet selgitavate joonistega, siis jõude märkivate noolte puhul on tähtis vaid noolte suund, mis näitab vastava jõu suunda, mitte noolte pikkus ega noolte alguspunktid.



Joonis 8. Mehaanilise eelpingestase C-olukorras jõu mõõtmise skeem.

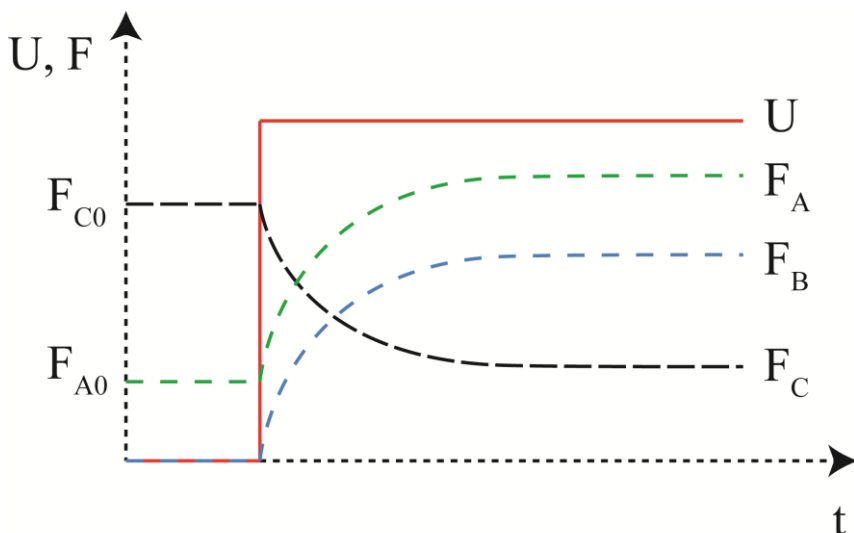
Joonisel 9 on kujutatud mehaanilise eelpingestase A-olukorras jõu mõõtmise skeemi. A-piirkonnas mõõdetakse jõudu algasendist negatiivses suunas, seejuures kasutades sama polaarsust mis eelnevates piirkondades mõõtmisel. Enne jõu mõõtmise algust deformeeritakse aktuaator jõuanduri abil algasendist negatiivses suunas. Sellises olukorras mõjub aktuaatorile ainult elastsusjõud (joonis 9A). Aktuaatori ühendamisel pingeallikaga tekib aktuaatoris jõud, mis on elastsusjõuga samasuunaline (joonis 9B). Samasuunalised jõud liituvad ning aktuaator näitab suuremat jõudu kui mehaaniliselt eelpingestamata mõõtmise korral saadud F_{\max} .



Joonis 9. Mehaanilise eelpingestase A-olukorras jõu mõõtmise skeem.

Joonisel 10 on kujutatud erinevate joonisel 7 kirjeldatud olukordade puhul mõõdetav jõu signaal mõõtmise alguses, kui aktuaator on lühistatud, ning aktuaatorile pinge U rakendamisel. Mehaaniliselt eelpingestamata olukorras (piirkond B joonisel 7) on jõu mõõtmise alguses jõuandurile mõjuv jõud 0. Aktuaatori pingeallikaga ühendamisel liigub

aktuaator vastu jõuandurit ning jõuandur näitab kasvavat jõudu, mis jõuab küllastusse nivool F_B . Mehaaniliselt eelpingestamata jõu mõõtmise korral loetakse kirjeldatud nivoo väärtust jõu väärtuseks antud piirkonnas..



Joonise 10. Jõusignaali erinevates mõõtepiirkondades jõu mõõtmisel.

Mehaanilise eelpingestatuse A-piirkonnas (A, joonisel 7) mõjub enne jõu mõõtmise algust jõuandurile aktuaatori poolt vaid elastusjõud (väärtusega F_{A0} joonisel 10). Aktuaatorile pinge rakendamisel tekkiv jõud suurendab jõuandurile mõjuvat jõudu kuni see küllastub väärtusel F_A , mis loetakse jõu väärtuseks A-piirkonnas jõu mõõtmise korral.

Mehaanilise eelpingestatuse C-piirkonnas (C, joonisel 7) mõjub enne jõu mõõtmise algust jõuandurile aktuaatori poolt vaid elastusjõud (väärtusega F_{C0} joonisel 10). Aktuaatorile elektrilise pinge rakendamisel hakkab selles tekkiva jõu tulemusena jõuandurile mõjuv jõud vähenema kuni küllastub väärtusel F_C . C-piirkonnas jõu mõõtmisel loetakse jõu väärtuseks küllastusnivoo F_C ning enne elektrilise pinge rakendamist mõjunud elastusjõu väärtuse F_{C0} vahet $F_C - F_{C0}$, millest tulenevalt on C-piirkonnas jõu väärtused negatiivsed.

Joonistel 7, 8 ja 9 kirjeldatud jõu-painde sõltuvuse põhimõtteline skeem kehtib kasutades positiivset polaarsust. Aktuaatorile negatiivse polaarsuse rakendamisel tekiks jõu-telje suhtes peegelsümmeetriline olukord. Eksperimentides on jõu-painde sõltuvusi mõõdetud mõlema polaarsusega ning samal pingel saadud tulemused on kujutatud ühel graafikul.

3.3 Jõu-painde sõltuvuse uurimine

3.3.1 Aktuaatori tagasivajumise iseloomustamine

Tagasivajumise kiiruse ja ulatuse kontrollimiseks tehti kõigepealt üks mõõteseeria mehaaniliselt eelpingestamata aktuaatoriga. Seejärel registreeriti aktuaatori deformatsioon vahetult pärast mõõtmist, 10 minutit pärast mõõtmist ning kolm ööpäeva pärast mõõtmist. Kuna kasutatud aktuaatorid olid madala elastsusmooduliga, siis esines enamikul aktuaatoritel algasendis kuni mõnekraadine deformatsioon, s.t ükski aktuaator ei olnud algselt täiesti sirge vaid veidi kõverdunud. Eksperimendis vastab aktuaatori algne deformatsioon sellisele deformatsioonile, mis esines aktuaatori mõõtekompleksi klemmide vahele asetamisel.

Eksperimendi tulemused on toodud tabelis 2. 10 minutit tagasivajumist vähendas aktuaatori deformatsiooni 4% võrra ning kolme ööpäeva jooksul oli deformatsioon vähenenud summaarselt 56% võrra. Liigutuse käigus toimuvad aktuaatoris ka plastised muutused, mistõttu ei pruugi aktuaator kunagi algasendisse tagasi jõuda. Antud tulemuste põhjal on õigustatud vastusignaali kasutamine, sest selle abil on võimalik taastada sekundite jooksul aktuaatori algasend.

Tabel 2. Aktuaatori tagasivajumise sõltuvus ajast.

Deformatsioon	Kraadides	Absoluutne deformatsioon kraadides	Absoluutne deformatsioon protsentides (võrreldes algsega)
Algne	3	0	0%
Vahetult pärast mõõteseeriat	-1,5	4,5	100%
10 minutit pärast mõõteseeriat	-1,3	4,3	96%
Kolm ööpäeva pärast mõõteseeriat	1	2,0	44%

3.3.2 Jõu-painde sõltuvuse uurimine erinevat tüüpi mehaanilise eelpingestatuse korral

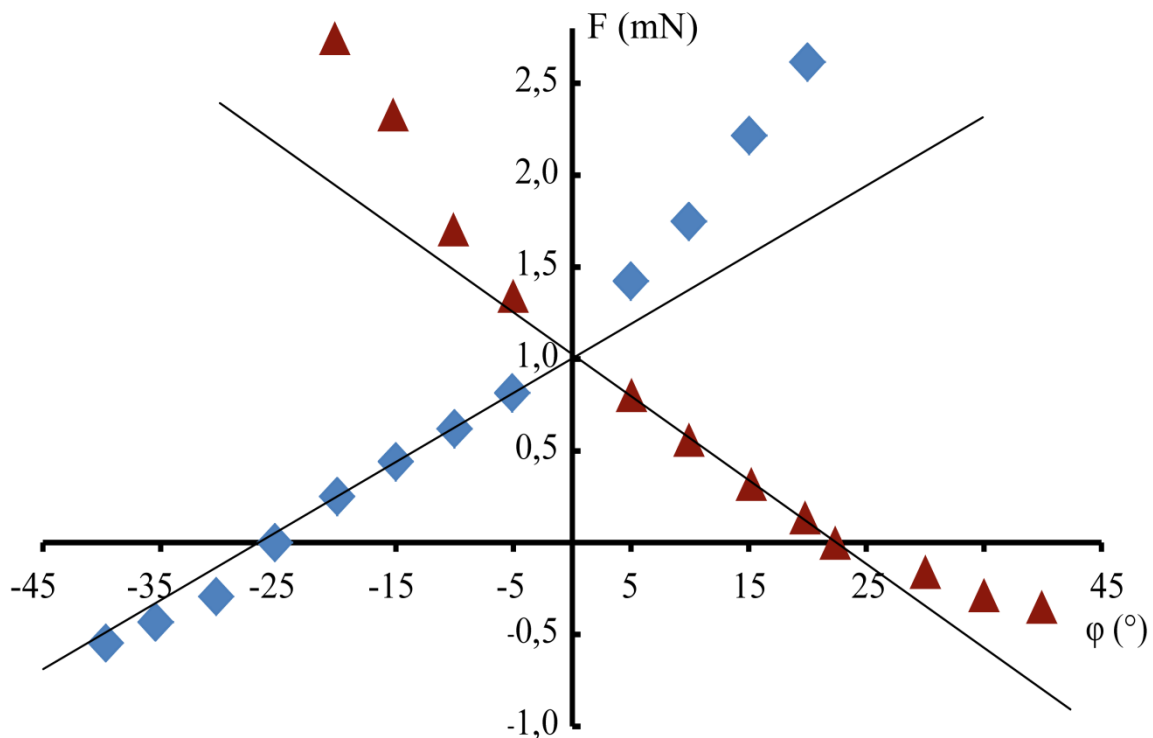
Erinevate painete all jõu mõõtmiseks tehti kõigepealt aktuaatoriga täisliigutus mõlemas suunas, et oleks võimalik kaamerapildi abil valida erinevad paindenurgad, mille alla jõuandurit seada. Seejärel hakati mõõtma aktuaatori poolt avaldatavat jõudu erinevate painete

all. Jõu väärtuseks igal paindel loeti jõu väärtust, millel aktuaatori poolt avaldatav jõud küllastus. Seejärel mõõdeti aktuaatori poolt avaldatava jõu väärtust alates painde väärtusest 5° sammuga 5° suuremate paindenurkade poole. Jõudu ei mõõdetud väiksema painde väärtusel kui 5° , sest põhimõõtmistele eelnevad katsed näitasid, et mõõtmiste käigus tekib jääkdeformatsioon väärtusega kuni 2° . Seega ei ole kord võimalik mõõteseria käigus mõõta jõudu aktuaatori algasendis 0° ning otsustati võtta esimeseks painde väärtuseks, mille juures jõudu mõõdetakse $\pm 5^\circ$. Suurimaks paindeks, mille juures mehaaniliselt eelpingestamata aktuaatori korral jõudu mõõdeti, oli 5° sammuga liikudes mõned kraadid enne maksimaalset painet. Täisliigutuse videolt saadud maksimaalne paindenurk võeti samuti katsepunktiks ning jõud antud punktis on 0 mN.

Jõu mõõtmisi alustati piirkonnas, kus aktuaator oli mehaaniliselt eelpingestamata. Korraga mõõdeti ainult ühe väärtuse ning polaarsusega pingega väikestest paindest ($\pm 5^\circ$) järjest suurema paindeni ning seejärel teostati analoogselt mõõtmine vastupidise polaarsusega. Näiteks pingel +1,5 V mõõdeti jõudu intervalliga 5° paindenurkadel 5° kuni 25° (maksimaalne liigutusulatus $27,6^\circ$). Pingel -1,5 V mõõdeti jõudu intervalliga 5° paindenurkadel -5° kuni -20° (maksimaalne paindenurk $-24,7^\circ$). Analoogselt kirjeldatuga teostati mõõtmised kõrgematel pingetel.

Pärast mehaaniliselt eelpingestamata piirkonnas jõu mõõtmist mõõdeti jõu-painde sõltuvused mehaanilise eelpingestatuse olukordades. Ühel pingel saadud tulemused kanti graafikule, mille abstsisseljel oli aktuaatori paine ja ordinaatteljel antud painde juures mõõdetud jõud.

Joonisel 11 on kujutatud jõu-painde sõltuvus mõõdetuna pingel 1,5 V nii mehaaniliselt eelpingestamata olukorras kui ka kahes mehaaniliselt eelpingestatud olukorras. Nendest tulemustest on näha, et mehaanilise eelpingestatuse olukordades esinev jõu-painde sõltuvus erineb mehaaniliselt eelpingestamata olukorras mõõdetud jõu-painde sõltuvusest. Seda tüüpi materjalidele omaste relaksatsiooniprotsesside olemust arvestades on põhjust oletada, et sarnased protsessid esinevad ka mehaanilise eelpingestatuse korral. Relaksatsiooniprotsesside raames esineb lisaks elastsele deformatsioonile ka plastne deformatsioon, mis tingib ajas progresseeruva jääkdeformatsiooni tekke. Sellest tingituna on mõõtmistulemused ajas dünaamiliselt muutuvad. Eelnevast lähtudes otsustati edasistes eksperimentides jätta mehaanilise eelpingestatuse olukorrad kõrvale ning uurida jõu-painde sõltuvust ainult mehaaniliselt eelpingestamata piirkonnas. Järgnevates eksperimentides on jõu-painde sõltuvuse all mõeldud jõu-painde sõltuvust mehaaniliselt eelpingestamata olukorras.



Joonis 11. Eksperimendis mõõdetud jõu-painde sõltuvus pingel 1,5 V nii mehaaniliselt eelpingestamata kui mehaaniliselt eelpingestatud aktuaatori korral.

3.3.3 Mehaaniliselt eelpingestamata aktuaatori jõu-painde sõltuvus erinevatel tööpingetel

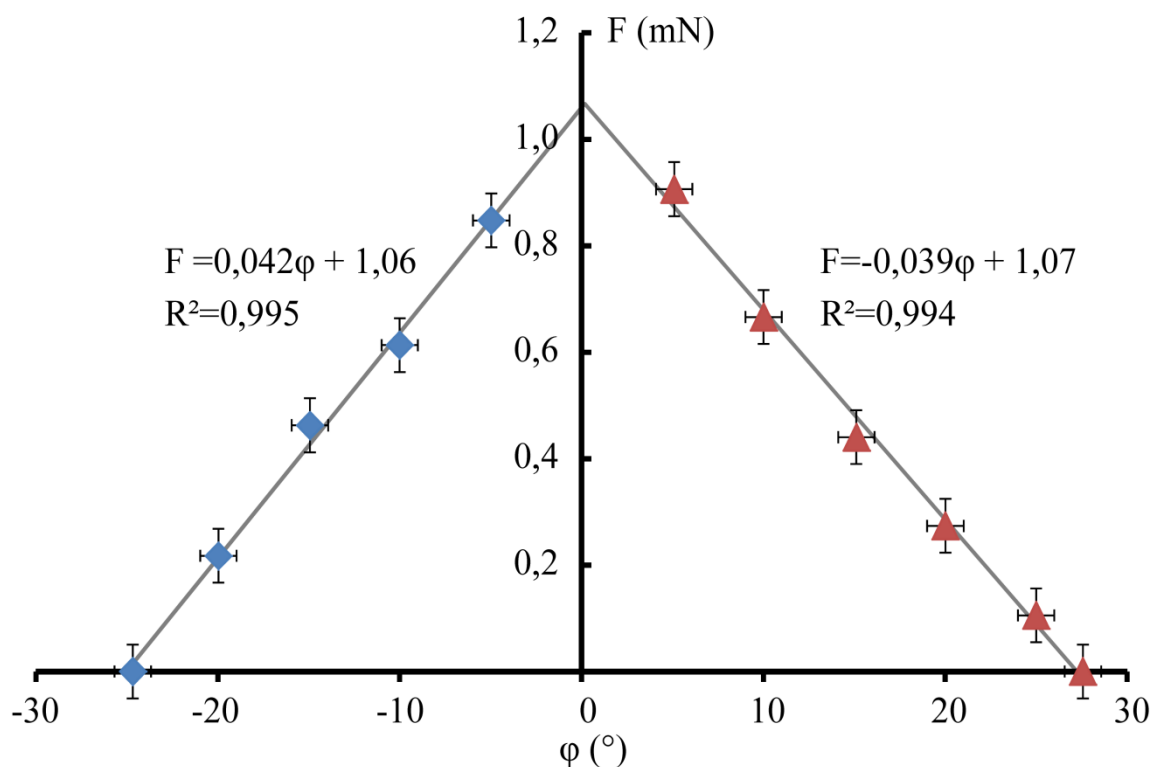
Aktuaatori jõu-painde sõltuvust mõõdeti pingetel 1,5 V kuni 2,5 V intervalliga 0,25 V.

Paindenurga määramise ning jõuanduri õige paindenurga juurde seadmise täpsuseks on antud mõõtmiste korral võetud 1°.

Joonisel 12 on toodud pingel 1,5 V saadud jõu-painde sõltuvuse graafik. Katsepunkte on lähendatud regressioonisirgega. Igale katsepunktile on lisatud vea piirid, võttes aluseks paindenurga summaarset viga 1° ning jõuanduri viga 0,0506 mN (peatükist 3.2.1).

Graafikule on lisatud ka regressioonisirge valem kujul $F = k\varphi + b$, kus k on regressioonisirge tõus ning b on vabaliige. Tabelisse 3 on koondatud pingel 1,5 V mõõdetud jõu-painde sõltuvuse uurimisel saadud maksimaalne jõud F_{\max} , ning sellele vastava nurga θ väärtus. F_{\max} ning θ väärtuseks on võetud erineva polaarsusega mõõdetud sirgete ristumispunkti koordinaadid. Ideaalolukorras, kus plastset deformatsiooni ei teki, kehtib $\theta = \varphi_0 = 0^\circ$. Kui jõu mõõtmise käigus tekib plastne deformatsioon, siis nihkub maksimaalse

jõu asukoht ning eelneva võrduse esimene pool ei kehti. Siin ja edaspidi kasutatakse jõumaksimumi ning selle asukoha mõistena vastavalt antud pingel saadud F_{\max} ning θ väärtusi. Lisaks on tabelis ära toodud determinatsioonikordajad R^2 .



Joonis 12. Pingel 1,5 V mõõdetud jõu-painde sõltuvus.

Tabel 3. Pingel 1,5 V mõõdetud jõu-painde sõltuvuse andmed.

U (V)	F_{\max} (mN)	θ (°)	R^2
+1,5	1,07	0,2	0,994
-1,5			0,995

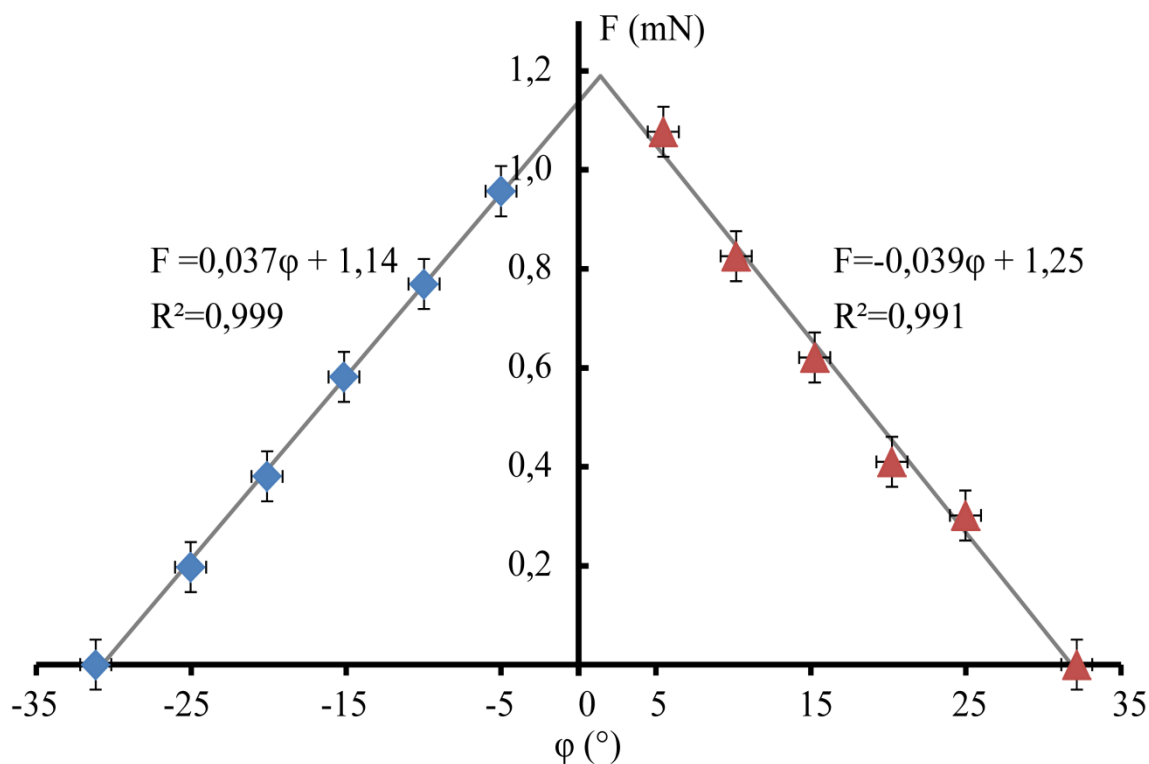
Aktuaatori käitumise sümmeetrilisust võib iseloomustada erineva polaarsusega teostatud mõõtmiste korral saadud regressioonisirge tõusude abil – ideaalselt sümmeetriliselt käituval aktuaatoril peaksid tõusud olema samad. Joonise 11 põhjal võib öelda, et aktuaator ei käitu pingel 1,5 V ideaalselt sümmeetriliselt, kuid teatud sümmeetrilisus on siiski olemas – erineva polaarsusega mõõdetud tõusude absoluutväärtuste erinevus on 7% suuremast väärtusest. Regressioonisirge lähendab katsepunkte määramatuse piires, millest tulenevalt võib väita, et pingel 1,5 V on jõu-painde sõltuvus lineaarne.

Märkimisväärne on ka asjaolu, et jõumaksimumi asukoht θ on üsna 0° juures ($0,2^\circ$), mis on 0,3% täielikust liigutusulatuses antud pingel. Täielikuks liigutusulatuses loetakse erineva polaarsusega teostatud liigutuste maksimaalsete painete absoluutväärtuste summasid, mis pingel 1,5 V on 52° .

Jõumaksimumi asukoha nihkumist võib põhjustada kaks asjaolu: aktuaatori elektrootides tekkiv plastne deformatsioon ning rakendatud elektriväljast põhjustatud muutused membraanis. Kui aktuaatoris tekib plastne deformatsioon, siis nihkub jõumaksimumi nurk sellele vastavalt – algasend, milles aktuaator avaldab maksimaalset jõudu ei ole enam 0° , vaid nurga juures, mis on tingitud aktuaatori jäävast deformatsioonist plastse deformatsiooni tulemusena. Hetkel ei ole ammendavat seletust sellele, milliseid pöördumatuid muutusi elektriväli aktuaatoris põhjustab ning mis neist muutustest täpselt põhjustab jäävat deformatsiooni aktuaatoris.

Jõumaksimumi asukoha võrdlemisi vähene muutumine (0,3% täielikust liigutusulatuses) pingel 1,5 V näitab, et antud pingel toimuvad aktuaatoris küll teatud mehaanilised ning elektriväljast põhjustatud muutused, kuid nende mõju ei muuda märgatavalt jõumaksimumi asukohta.

Joonisel 13 on kujutatud pingel 1,75 V mõõdetud jõu-painde sõltuvus. See ja järgnevad jõu-painde sõltuvuse joonised on koostatud samadel põhimõtetel mis pingega 1,5 V mõõdetud jõu-painde sõltuvuse joonis. Tabelid 4 ja 5 on moodustatud samal põhimõttel, mis Tabel 3.



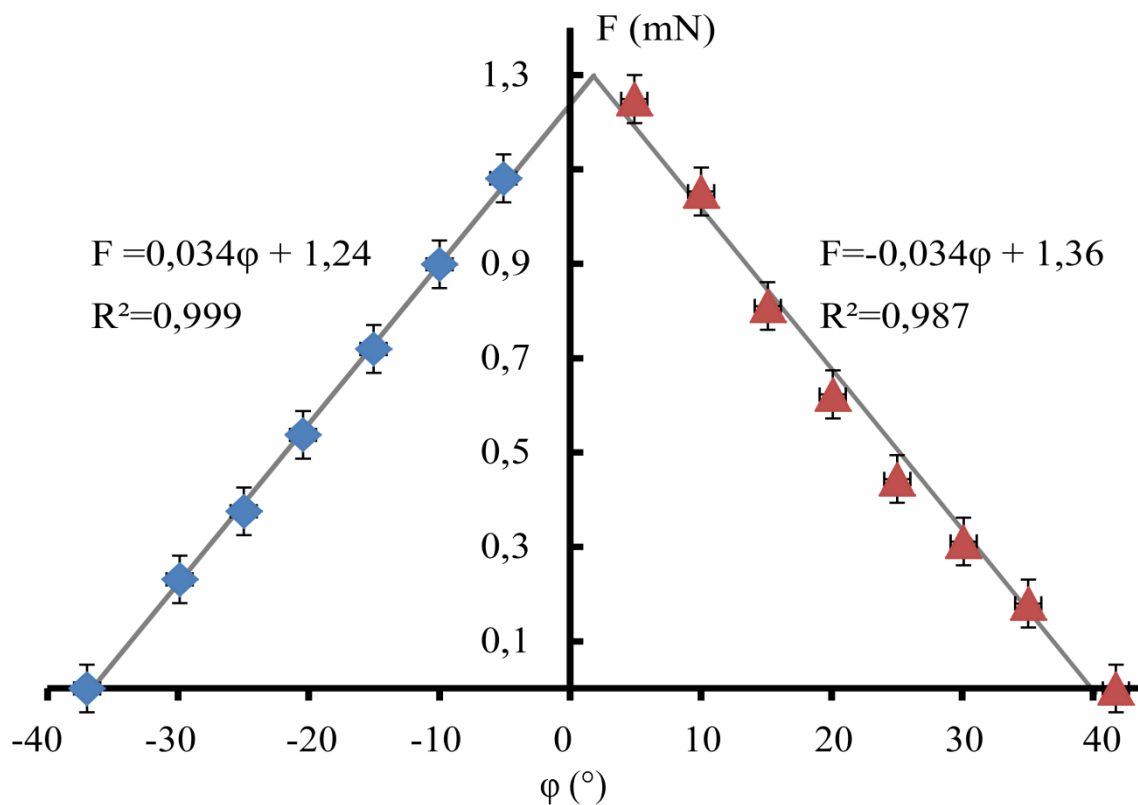
Joonis 13. Pingel 1,75 V mõõdetud jõu-painde sõltuvus.

Tabel 4. Pingel 1,75 V mõõdetud jõu-painde sõltuvuse andmed.

U	F_{\max} (mN)	θ (°)	R^2
+1,75 V	1,19	1,4	0,991
-1,75 V			0,999

Pingel 1,75 jäävad katsepunktid määramatuse piires regressioonsirgele, seega on jõu-painde sõltuvus pingel 1,75 V lineaarne. Regressioonsirgete tõusude absoluutväärtuste erinevus on 5,5% suuremast väärtusest. Jõumaksimumi asukoht θ on nihkunud algasendist $1,4^\circ$ ehk 2,2% täielikust liigutusulatusest antud pingel.

Joonisel 14 on kujutatud pingel 2,0 V mõõdetud jõu-painde sõltuvust. Tabelisse 5 on koondatud sel pingel mõõdetud ning joonisel 13 kujutatud jõu-painde sõltuvuse parameetrid.



Joonis 14. Pingel 2,0 V saadud jõu-painde sõltuvus.

Tabel 5. Pingel 2,0 V mõõdetud jõu-painde sõltuvuse andmed.

U	F_{\max} (mN)	θ (°)	R^2
+2,0 V	1,30	1,8°	0,987
-2,0 V			0,999

Pingel 2,0 V kirjeldab lineaarne lähendus aktuaatori jõu-painde sõltuvust määramatuse piires. Tõusude erinevus on 0,6% suurema tõusu väärtusest. Samas on positiivse polaarsusega teostatud mõõtmiste korral näha, et katsepunktid ei jaotu regressioonisirge suhtes ühtlaselt, s.t esineb jõu-painde sõltuvuse spetsiifiline kõrvalekalle lineaarsest. Väiksemate paindenurkade juures on mõõdetud jõud suuremad, kui vastavad väärtused regressioonisirgel. Liigutusulatuse keskel on mõõdetud jõud väiksemad, kui vastavad regressioonisirgest arvutatud väärtused. Suurte nurkade juures on mõõdetavad jõud taas suuremad kui vastavad väärtused regressioonisirgel.

Sarnane regressioonisirgest hälvimine on vähemal määral aimatav positiivse polaarsusega teostatud mõõtmiste korral ka pingetel 1,5 V ning 1,75 V. Samuti on sarnane spetsiifiline

kõrvalekalle lineaarsusest väga vähesel määral näha ka negatiivse polaarsusega tehtud mõõtmiste korral pingetel 1,5 V; 1,75 V ning 2,0 V.

Kuna antud töö eesmärk on leida aktuaatori kirjeldamiseks võimalikult lihtne sõltuvus jõu ja painde vahel, siis on jäädud madalamatel pingetel kasutatud lineaarse lähenduse juurde ning ei ole otsitud jõu-painde sõltuvust täpselt kirjeldavat võrrandit. Ka veelgi kõrgematel pingetel (2,25 V ja 2,5 V) on otsustatud kasutada lineaarset lähendust, leida sellise lähendusega tehtav viga erinevatel tööpingetel ning seeläbi välja selgitada jõu-painde sõltuvuse lineaarse lähenduse kasutamise piirid erinevatel tööpingetel.

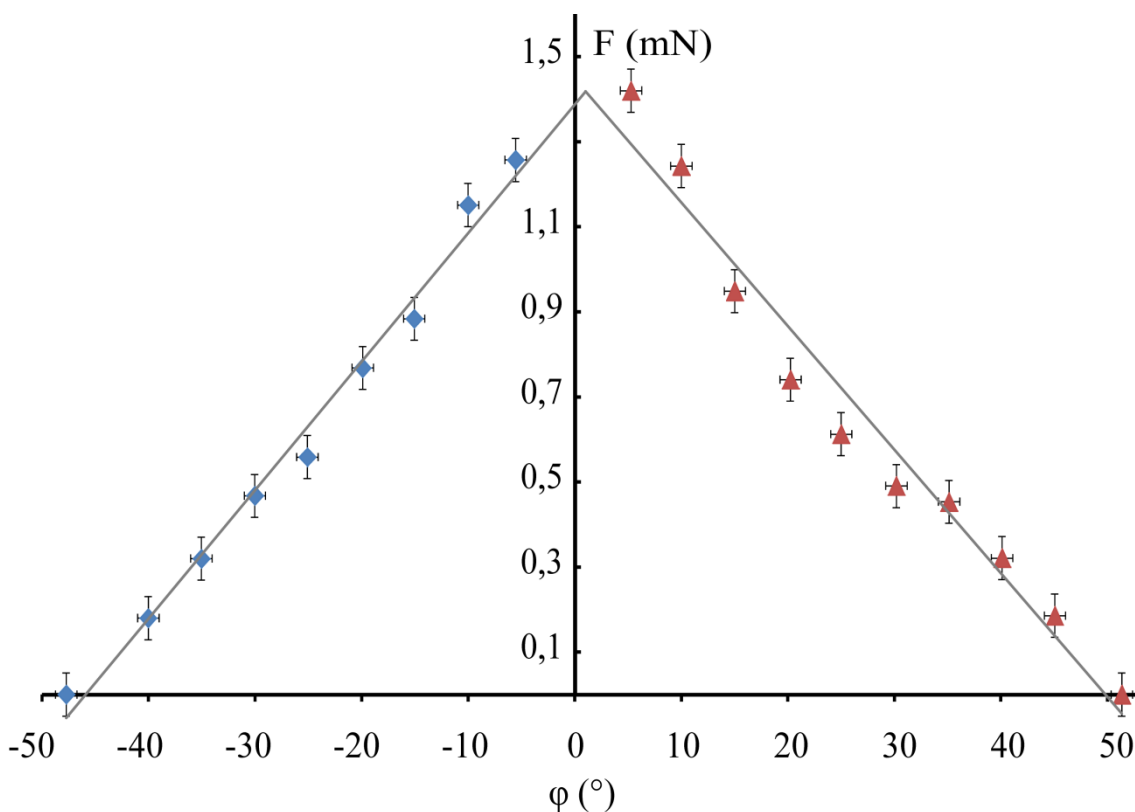
See, et ühes suunas teostatud liigutuse korral avaldub jõu-painde sõltuvuse sirgest hälbimine rohkem kui teises suunas teostatud liigutuse korral on seletatav antud materjali valmistamisprotsessi iseärasustest tuleneva ebahomogeensusega, mida on kirjeldatud eespool, peatükis 3.1. Teisel, samast suuremast tükist lõigatud aktuaatoril, millega teostati kontrollmõõtmised avaldus sarnane jõu-painde sõltuvuse kõverdumine võrreldes lineaarse seosega, seega on välistatud antud kõverdumise tulenemine ühe eksemplari iseärasustest.

Pingel 2,0 V mõõdetud jõu-painde sõltuvuse maksimaalne jõud on algasendist nihkunud $1,8^\circ$ võrra, mis moodustab 2,3% täielikust liigutusulatuses antud pingel. Jõumaksimumi nihkumise väärtus kraadides on pingel 2,0 V suurem kui pingetel 1,5 V ja 1,75 V. See on seletatav kahe asjaoluga. Esiteks suurendatakse pinge suurendamisega ka elektrivälja aktuaatoris, mille tagajärjel on elektriväljast põhjustatud muudatused ulatuslikumad ja vähem pöörduvad ning ei kao aktuaatori lühistamisel nii täielikult, kui madalamatel pingetel. Teiseks on suuremal pingel aktuaatori liigutusulatus suurem, s.t kõrgema pinge korral paindub aktuaator rohkem, mistõttu painduvad ka elektroodid rohkem ning plastse deformatsiooni ulatus elektroodides suureneb.

Jõumaksimumi nihkumise vähendamiseks teostati edaspidistel mõõtmistel kahe erineva polaarsusega mõõteseeria tegemise vahel aktuaatoriga üks täisliigutus mõlemas suunas. Selleks lasti kõigepealt aktuaatoril ühe polaarsusega jõuda maksimaalse paindeni, lühistati aktuaator seni, kuni see oli tagasi vajunud algasendi lähedasse asendisse, ning seejärel rakendati vastupidisega polaarsusega signaali, mille tagajärjel aktuaator liigutas teises suunas maksimaalse paindeni. Seejärel aktuaator lühistati ja viidi vastusignaali kasutades algasendisse. Eelnevatel mõõtmistel teostati kahe erineva polaarsusega mõõtmised vahetult üksteise järel. Täisliigutus erineva polaarsusega mõõtmiste vahel peaks vähendama pidevalt

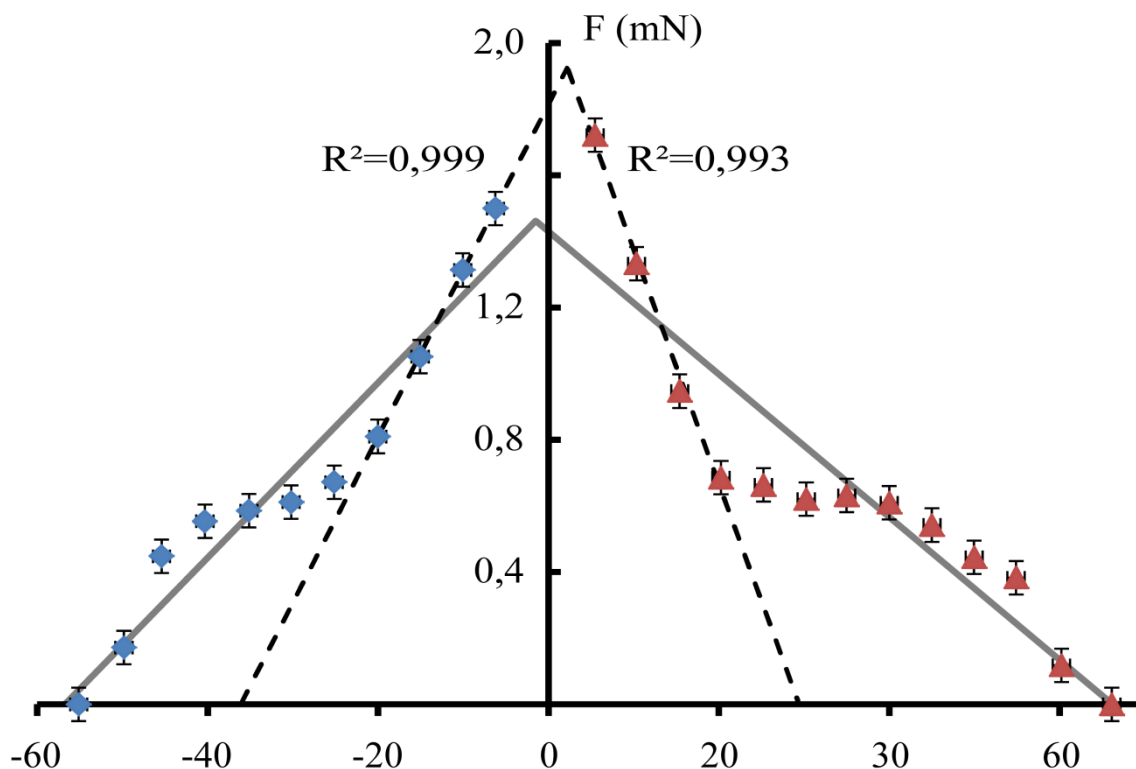
ühes suunas liigutamisega kaasnenud plastset deformatsiooni elektrootides ning tasakaalustama aktuaatorisisesid muutusi.

Joonisel 15 on kujutatud pingel 2,25 V mõõdetud jõu-painde sõltuvus. Jooniselt on näha, et positiivse polaarsusega tehtud mõõtmiste korral ei asu mõõdetud katsepunktid regressioonisirgel, mistõttu kõigi sellel tööpingel saadud mõõtmistulemuste korral ei loeta lineaarset lähendust sobivaks. Seetõttu ei ole eraldi välja toodud tõusu, vabaliikme, maksimaalse jõu ega maksimaalse jõu asukoha väärtusi. Jooniselt on näha, et pingel 2,25 V on madalamatel pingetel täheldatud spetsiifiline kõrvalekalle regressioonisirgest veelgi võimendunud.



Joonis 15. Pingel 2,25 V mõõdetud jõu-painde sõltuvus.

Joonisel 16 on kujutatud pingel 2,5 V mõõdetud jõu-painde sõltuvust. Samadel põhjusel, mis pingel 2,25 V on ka siin välja toodud vaid determinatsioonikordaja ning teised jõu-painde sõltuvuse mõõtmisel saadud parameetrid on ära jäetud. Pingel 2,5 V ilmnes väikeste paindenurkade (kuni $\pm 20^\circ$) puhul lineaarne ala, kuid käesoleva töö käigus ei ole seda lähemalt uuritud, sest eesmärgiks oli kirjeldada jõu-painde sõltuvust kogu liigutuse ulatuses.



Joonis 16. Pingel 2,5 V mõõdetud jõu-painde sõltuvus.

Jooniselt 16 on näha, et pingel 2,5 V hälbivad jõu-painde sõltuvuse katsepunktid kogu liigutusulatuste põhjal joonistatud regressioonisirgest veelgi enam kui madalamatel pingetel ning aktuaatori jõu ja painde vahel ei esine lineaarset seost. Lisaks on näha, et nagu ka madalamatel pingetel, on positiivse polaarsusega mõõdetud jõu-painde sõltuvuse korral kõrvalekaldeid sirgest suuremate väärtustega kui negatiivse polaarsusega tehtud mõõtmiste korral. Jõu-painde sõltuvus on omandanud väga spetsiifilise kuju, mis on põhikujult sama nii positiivse kui negatiivse polaarsusega teostatud mõõtmiste korral. See annab tunnistust erinevate protsesside domineerimisest paindenurga suurenemisel.

3.4 Tulemused ja arutelu

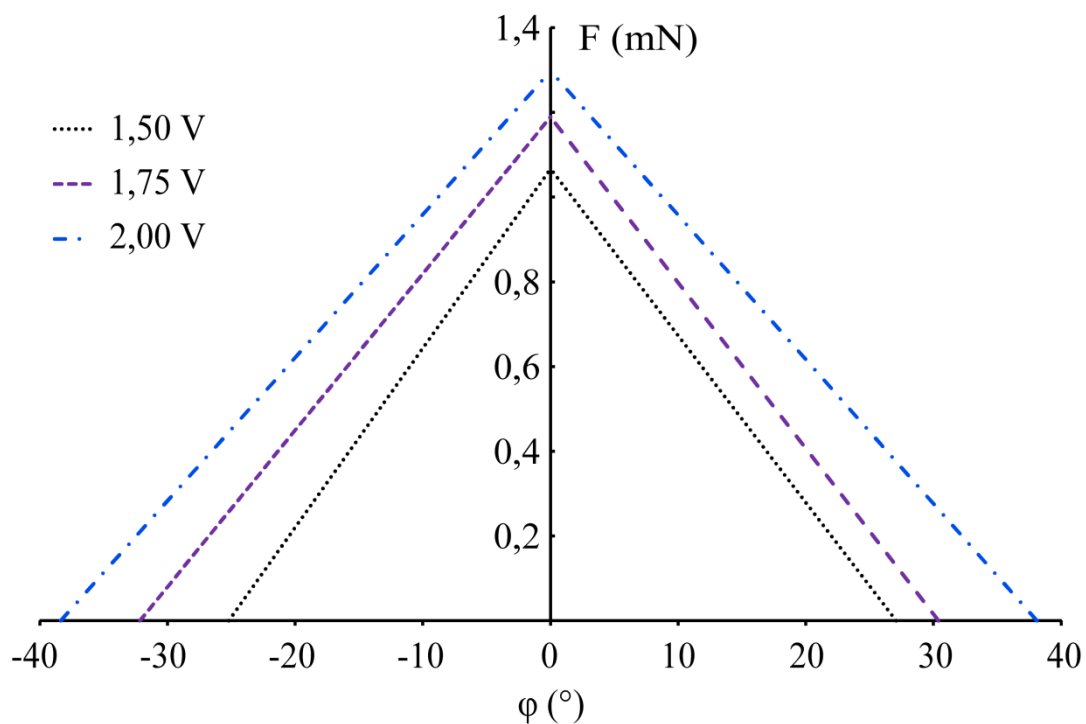
Käesolevas töös on uuritud kullaga kaetud süsinikelektroodidega ionopolümeer-metall komposiitmaterjali jõu ja painde vahelist sõltuvust erinevatel tööpingetel ning erinevaid mõõtepiirkondi kasutades. Mõõtmistest selgus, et ei ole võimalik leida lihtsat jõu-painde sõltuvust mis kirjeldaks edukalt kõiki uuritud mõõtepiirkondi. Seetõttu keskenduti vaid

mehaaniliselt eelpingestamata aktuaatori jõu-painde sõltuvuse uurimisele erinevatel tööpingetel.

Mõõtmistest selgus, et pingetel 1,5 V kuni 2,0 esineb mehaaniliselt eelpingestamata aktuaatori korral jõu ja painde vahel lineaarne seos. Kõrgematel pingetel kui 2,25 V esineb olulisel määral spetsiifiline kõrvalekalle lineaarsest seosest. Ka teistes sarmadel põhimõtetel töötavate materjalidega tehtud jõu-liigutuse sõltuvuse mõõtmistes on täheldatud lineaarset seost jõu ja liigutusulatuse vahel [1, 34] ning antud töös uritud materjali korral esinevat spetsiifilist kõrvalekallet lineaarsusest [1, 3-4]. Teiste materjalide puhul on see spetsiifiline kõrvalekalle lineaarsusest vähem eristuv ning seetõttu on mainitud tööde autorid lugenud need seosed lineaarseks. Kuna spetsiifilist kõrvalekallet jõu-painde lineaarsest seosest esineb ka teiste materjalide puhul, tähendab see, et eksperimendid olid sooritatud korrektselt ning kõrvalekalded lineaarsusest on põhjustatud uuritava materjali ja samadel põhimõtetel töötavate materjalide iseärasustest.

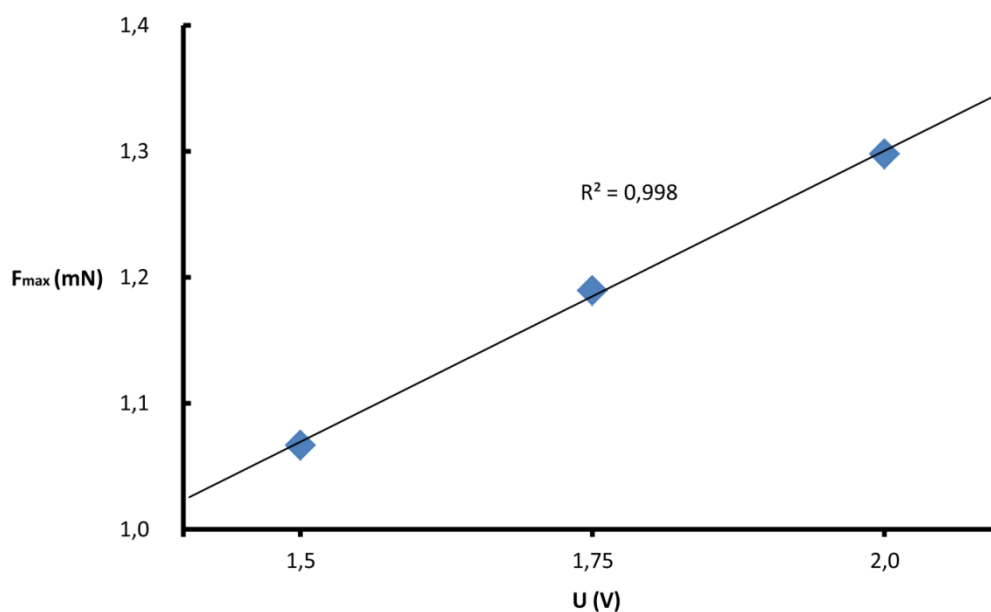
Joonisele 16 on koondatud pingetel vahemikus 1,5 kuni 2 V mõõdetud jõu-painde sõltuvusi kirjeldavad regressioonisirged. Kõigi sama tööpinge kuid erineva polaarsusega teostatud mõõtmiste regressioonisirgete ristumispunktid on normeeritud nurga järgi (0°).

Jooniselt võib näha tendentsi jõu-painde sõltuvuse regressioonisirgete tõusude absoluutväärtuste vähenemises tööpinge kasvamisel, mida ei ole varem sarnaste materjalidega teostatud mõõtmiste korral täheldatud [3-4] - sirgete väärtused on nendes olnud erinevatel pingetel samad. See võib viidata uuritava materjali elastsusmooduli vähenemisele tööpinge kasvamisel, sest madalama elastsusmooduli korral on võimalik saada samuti suuremat liigutusulatust. Elastsusmooduli vähenemine võib olla põhjustatud kõrgema pinge kasutamisega kaasnevast temperatuuritõusust. Kõrgema pinge kasutamisel suureneb ka vool, mis põhjustab temperatuuri tõusu. Temperatuuri kasvamisel materjalide elastsusmoodulid reeglina vähenevad.



Joonis 16. Erinevatel pingetel mõõdetud jõu-painde sõltuvuse regressioonisirged.

Pingetel, kus jõu ja painde vahel esineb lineaarne sõltuvus (1,5 V – 2 V) selgus, et aktuaatori poolt avaldatav maksimaalne jõud sõltub kasutatavast pingest lineaarselt. Joonisel 17 on kujutatud maksimaalse jõu sõltuvust kasutatavast pingest. Sarnane tulemus on saadud ka elektronjuhtivatel polümeeridel põhinevate aktuaatorite jõu ja kasutatava pinge sõltuvuse uurimisel [4, 34].



Joonis 17. Maksimaalse jõu sõltuvus kasutatavast pingest.

Kokkuvõte

Süsinikelektroodidega ioonpolümeer-metallkomposiitmaterjali painde ja jõu vahelise sõltuvuse uurimine

Edgar Hamburg

Käesolevas töös uuriti esmakordselt kullakattega süsinikelektroodidega ioonpolümeer-metall komposiitmaterjalist aktuaatori jõu-painde sõltuvust. Töö eesmärgiks oli leida võimalikult lihtne jõu-painde sõltuvus, kontrollida selle kehtivust erinevatel tööpingetel ning erinevates algtingimustes.

Töö käigus selgus, et ühtviisi edukalt kõiki tööpiirkondi kirjeldavat lihtsat jõu-painde sõltuvust antud materjalil ei esine. Sellest tulenevalt keskenduti vaid mehaaniliselt eelpingestamata aktuaatori jõu-painde sõltuvuse uurimisele erinevatel tööpingetel vahemikus 1,5 V kuni 2,5 V.

Mehaaniliselt eelpingestamata olukorras esines lineaarne sõltuvus aktuaatori poolt avaldatava jõu ja painde vahel pingevahemikus 1,5 V kuni 2 V. Sellest kõrgemate pingete kasutamisel esines spetsiifiline kõrvalekalle lineaarsusest. Analooget käitumist on sarnaste materjalidega teostatud eksperimentides märgata ka teiste autorite poolt varem publitseeritud uurimustes

Jõu-painde sõltuvuse lineaarse lähenduse korral ilmnes mõningane jõu-painde sõltuvuse tõusude väärtuste vähenemine tööpinge suurenedes, mis võib tuleneda temperatuuri kasvust kõrgemate pingete kasutamisel. Kõrgemate tööpingetega kaasneb suurem vool, mis tõstab materjali temperatuuri. Materjali soojenedes reeglina elastsusmoodul väheneb.

Edaspidistes eksperimentides tasuks uurida kasutatud materjali elastsusmooduli sõltuvust temperatuurist ning kontrollida, kas eksperimentides kasutatavatel pingetel toimub aktuaatoris piisav temperatuuri tõus, et muuta materjali elastsusmoodulit.

The relation between bending deflection and blocking force of the ionic polymer-metal composite (IPMC) with carbonaceous electrodes

Edgar Hamburg

Summary

The relation between deflection amplitude and blocking force of the ionic polymer-metal composite actuator was characterized for the first time. The scope of the work at hand was identification of the simplest model describing the relation between deflection amplitude and exerted force and validation of the model under different input voltages and initial conditions.

The results confirm that the dependence between deflection amplitude and blocking force could not be described by a simple relation at the whole range of investigated working conditions. For that reason, the research was particularly focused on identification of the relation between deflection amplitude and blocking force without pre-straining and at driving voltage range of 1.5 to 2.5 V. Without pre-straining and in the input voltage range of 1.5 to 2 V, the relation can be described simply with a linear model, with specific deviations at higher input voltages. Similar deviations have also been observed in the previously published studies.

At higher driving voltages, the slope between the deflection amplitude and blocking force decreases, which can be explained by the rise of temperature inside the actuator. The higher input voltages also result in the increase of current, which in turn results in the heat-up of the material. Higher temperature also decreases the elastic modulus of the material.

In the future work, the relation between the elastic modulus and temperature should be characterized to verify the effect of increased temperature at higher input voltages.

Kasutatud kirjandus

- [1] G. Y. Yun, H. S Kim, J. Kim Jaehwan Kim, Blocked force measurement of an electro-active paper actuator using a cantilevered force transducer, *Smart Materials & Structures* 17 (2008) 025021.
- [2] S. Mekid, B. Lim, Characteristics comparison of piezoelectric actuators at low electricfield: analysis of strain and blocking force, *Smart Materials & Structures* 13 (2004) N93–N98.
- [3] A. H Ji et al., Verification of Beam Models for Ionic Polymer-Metal Composite Actuator, *Journal of Bionic Engineering* 6 (2009) 232–238.
- [4] K.J Kim, Ionic Polymer-Metal Composite as a New Actuator and Transducer Material, kogumikus: *Electroactive Polymers for Robotic Applications, Artificial Muscles and Sensors*, K.J Kim, S Tadokoro (Toimetajad). Springer-Verlag London Limited 2007, 153-164.
- [5] V. Palmre, Fabrication and characterization of microporous carbon-based electroactive polymer actuators, *Doktoritöö, Tartu Ülikool*, 2012.
- [6] Y. Bar-Cohen, *Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles: reality, potential, and challenges*, 2nd ed., SPIE Press, Bellingham, Wash., 2004 22-23
- [7] M. Shahinpoor, K.J Kim, Ionic polymer-metal composites: IV. Industrial and medical applications, *Smart Materials & Structures* 14 (2005) 197-214.
- [8] Y. Bar-Cohen, Biomimetics using electroactive polymers (EAP) as artificial muscles – A review, *Journal of Advanced Materials* 38 (2006) 3-9.
- [9] Y. Bar-Cohen, *Biomimetics: biologically inspired technologies*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2006.
- [10] J. D. W Madden, Dielectric elastomers as high-performance electroactive polymers, Chapter 2 kogumikus *Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers: Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology*, (2008) 13-21.

- [11] L. Seminara et al., Electromechanical characterization of piezoelectric PVdF polymer films for tactile sensors in robotics applications, *Sensors and Actuators A: Physical* 169 (2011) 49-58.
- [12] A. Punning, M. Kruusmaa, A. Aabloo, A self-sensing ion conducting polymer metal composite (IPMC) actuator, *Sensors and Actuators A: Physical* 136 (2007) 656-664.
- [13] V. Palmre, S.J. Kim, K. Kim, Millimeter thick ionic polymer membrane-based IPMCs with bimetallic Pd-Pt electrodes, *Proceedings of SPIE*, 797615 (2011).
- [14] B.J. Akle, Characterization and Modeling of the Ionomer-Conductor Interface in Ionic Polymer Transducers, *Doktoritöö, Virginia Polütehniline Instituut ja Riiklik Ülikool*, (2005)
- [15] Y. Bar-Cohen, Electro-active polymers: current capabilities and challenges, *kogumikus SPIE's 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials* 1-7 (2002)
- [16] B. J. Akle et al., Direct assembly process: a novel fabrication technique for large strain ionic polymer transducers, *J Mater Sci* 42 (2007) 7031–7041.
- [17] S. Nemat-Nasser, Micromechanics of actuation of ionic polymer-metal composites, *J. Appl. Phys.* 92, (2002) 2899.
- [18] M. Shahinpoor, Ionic polymer-conductor composites as biomimetic sensors, robotic actuators and artificial muscles - a review, *Electrochimica Acta* 48 (2003) 2343-2353
- [19] V. Palmre et al., Electroactive polymer actuators with carbon aerogel electrodes, *J. Mater. Chem.*, 21 (2011) 2577.
- [20] A. Punning, M. Kruusmaa, A. Aabloo, Surface resistance experiments with IPMC sensors and actuators, *Sensors and Actuators A: Physical* 133 (2007) 200–209.
- [21] M. Shahinpoor, K.J Kim, Ionic polymer–metal composites: III. Modeling and simulation as biomimetic sensors, actuators, transducers, and artificial muscles", *Smart Mater. Struct.* 13 (2004) 1362–1388.
- [22] J. Torop et al., Nanoporous carbide-derived carbon based actuators modified with gold foil: Prospect for fast response and low voltage applications, *Sensors and Actuators B* 161 (2012) 629–634.

- [23] K. Mukai et al., High performance fully plastic actuator based on ionic-liquid-based bucky gel, *Electrochimica Acta* 5' (2008) 5555–5562.
- [24] F. Vidal et al., Long-life air working conducting semi-IPN/ionic liquid based actuator, *Synthetic Metals*, 142 (2004) 287-291.
- [25] J.D Madden et al., Fast contracting polypyrrole actuators, *Synthetic Metals* 113 (2000) 185–192.
- [26] V. Palmre, Vee elektrolüüsioonsetel polümeer-metall materjalidel põhinevate kunstlihaste töös, *Bakalaureusetöö*, Tartu Ülikool, 2006.
- [27] D. Bandopadhyaya, B.Bhattacharya, A. Dutta, An active vibration control strategy for a flexible link using distributed ionic polymer metal composites, *Smart Materials and Structures* 16 (2007) 617.
- [28] M. Yamakita, N. Kamamichi, Y. Kaneda, K. Asaka, Z.W Luo, Development of an artificial muscle linear actuator using ionic polymer-metal composites, *Advanced Robotics* 18 (2004) 383-399.
- [29] K. Yusaku et al., Sheet-Type Braille Displays by Integrating Organic Field-Effect Transistors and Polymeric Actuators, *Electron Devices, IEEE Transactions on* 54 (2007) 202-9.
- [30] M. Aureli, V. Kopman, M. Porfiri, Free-Locomotion of Underwater Vehicles Actuated by Ionic Polymer Metal Composites, *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* 15 (2010) 603-14.
- [31] G. Shuxiang, S. Liwei, K. Asaka, IPMC actuator-based an underwater microrobot with 8 legs, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA* (2008) 551-556.
- [32] J.J Hubbard et al., Characterization of Sectored-Electrode IPMC-Based Propulsors for Underwater Locomotion, *ASME Conference Proceedings* 2011 (2011) 171-80.
- [33] J.Rossiter, K. Takashima, T. Mukai, Shape memory properties of ionic polymer-metal composites, *Smart Mater. Struct.* 21 (2012) 112002.

- [34] G. Alici, An effective modelling approach to estimate nonlinear bending behaviour of cantilever type conducting polymer actuators, *Sensors and Actuators B: Chemical* (2009) 284-292.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Edgar Hamburg (sünnikuupäev: 21.02.1991):

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Süsinikelektroodidegaioonpolümeer-metall komposiitmaterjali painde ja jõu vahelise sõltuvuse uurimine”, mille juhendajad on LOTI teadur Urmas Johanson ning LOTI doktorant Veiko Vunder,
 - 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 29.05.2013